

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie Mécanique

ÉTUDE DE FAISABILITÉ SUR L'UTILISATION DE MOUSSES MÉTALLIQUES DANS
LES TRAITEMENTS ACOUSTIQUES DES
NACELLES DE MOTEUR D'AVION

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Rached BEN AYED

Jury : Raymond PANNETON (directeur)
Nouredine ATALLA
Maxime GAUTHIER

Sherbrooke (Québec) Canada

juin 2010

IV 2251



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-91664-3

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-91664-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

À ma mère, à mon père

RÉSUMÉ

Les constructeurs aéronautiques sont de plus en plus sensibles aux problèmes liés à la nuisance sonore due aux réacteurs des avions. De nos jours, on utilise les traitements acoustiques, qu'on appellera *liners* dans la suite du document, comme absorbeurs sonores. Ces absorbeurs sont sélectifs et leur comportement acoustique est non linéaire. Pour remédier à ces faiblesses, les mousses métalliques à porosité ouverte sont de bonnes candidates.

On a réalisé une étude de faisabilité sur l'utilisation des mousses métalliques dans les traitements acoustiques (*liners*) des nacelles de réacteur d'avion. Notre étude a porté sur une mousse à base de Nickel et une autre à base d'acier inoxydable (Inox): le procédé de fabrication étant basé sur le même principe, soit celui breveté par l'Institut des Matériaux Industriels (IMI) du Conseil National de Recherches du Canada (CNRC).

À partir de la caractérisation acoustique des mousses seules, on a pu vérifier que les mousses de Nickel ont un potentiel au niveau de l'absorption large bande et de la linéarité de la réponse acoustique en fonction du niveau d'excitation acoustique.

Les résultats de simulations des performances acoustiques de concepts de *liners* intégrant les mousses de Nickel sont bons, surtout au niveau de la masse surfacique ces matériaux peuvent concurrencer les plaques perforées. Par contre, pour les mousses en Inox, il s'avère que leur porosité est en grande partie fermée et qu'elles souffrent d'une hétérogénéité au niveau de la taille et de la distribution des pores : ceci détériore leurs performances acoustiques en tant qu'absorbeur large bande. Toutefois cela ne diminue en rien l'intérêt que peuvent susciter ces matériaux. En effet on s'est aperçu qu'ils sont assimilables, à faible épaisseur, à des plaques perforées au niveau de leur réponse acoustique. L'utilisation de ces mousses à la place des plaques perforées peut être bénéfique surtout au niveau du poids.

Au cours de notre étude, on s'est principalement intéressé aux performances acoustiques et à la masse surfacique des mousses. Les résultats obtenus sont bons. Par contre, pour donner une réponse claire quant à leur utilisation éventuelle dans les *liners* de moteur d'avion, d'autre éléments restent à être considérés, notamment le coût de production, les propriétés mécaniques, la fabrication à grande échelle, la formabilité et l'assemblage.

Mots clés : caractérisation acoustique, traitements acoustiques, absorbeur sonore, mousses de Nickel, mousse d'Inox, large bande, linéarité.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord mon directeur, le Professeur **Raymond Panneton**, pour la confiance qu'il a témoignée et pour son soutien dans les bons comme les mauvais moments. Il a su me motiver tout au cours de ces dernières années et à travers sa grande disponibilité et ses droits conseils, il m'a toujours permis de surmonter les multiples impasses que j'ai si bien su rencontrées. **Merci Raymond.**

Je remercie **Noureddine Atalla** et **Maxime Gauthier** d'avoir accepté de faire partie de mon jury de maîtrise.

Je remercie **Ridha Ben Mansour** et **Ahmed Daoud** d'avoir facilité ma venue au Québec.

Je remercie les membres du Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke pour leur accueil.

Je remercie ma famille pour le soutien et la confiance qu'ils m'ont accordée durant toutes mes études.

Enfin, je remercie mes amis pour les conseils qu'ils m'ont donnés

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
REMERCIEMENTS	iv
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
I. INTRODUCTION	1
1) Mise en contexte et motivation de l'étude	1
2) Définition du projet de recherche	1
3) Objectif	2
4) Problématique scientifique et technologique	3
a- Problématique technologique	3
b- Problématique scientifique	4
5) Méthodologie	5
II. ÉTAT DES CONNAISSANCES	8
1) <i>Linéers</i> à absorption sélective	8
a- <i>Absorption sonore dans les linéers à absorption sélective</i>	8
b- <i>Différents types de linéers à absorption sélective</i>	9
c- <i>Effets linéaire et non linéaire des linéers sélectifs</i>	11
d- <i>Modèles pour les linéers linéaires</i>	11
e- <i>Modèles pour les linéers non linéaires</i>	12
2) Traitement acoustique à large bande d'absorption	13
a- <i>Avantages</i>	13
b- <i>Absorbeurs large bande</i>	14
3) Conclusion	15
III. MODÉLISATION DES MOUSSES MÉTALLIQUES	17
1) Description	17
a- <i>Fabrication</i>	17
2) Phénomène de dissipation acoustique dans les matériaux poreux	20
3) Propriétés acoustiques des matériaux poreux	22
4) Concepts et modèles	24
IV. CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE	27
1) Description des échantillons	27
2) Description des mesures expérimentales réalisées	28
a- <i>Mesure de la porosité</i>	28
b- <i>Mesure de la résistivité</i>	29
c- <i>Mesures acoustiques</i>	29
3) Propriétés acoustiques des mousses de Nickel	31
a- <i>Caractérisation des mousses de Nickel avec un fond rigide</i>	31
b- <i>Caractérisation acoustique de la mousse avec une cavité de 10 mm</i>	33
c- <i>Étude de la symétrie de la réponse des mousses de Nickel</i>	36
d- <i>Effet de la cavité</i>	37
4) Propriétés acoustiques des mousses d'Inox	38
a- <i>Caractérisation des mousses d'Inox avec un fond rigide</i>	38
b- <i>Caractérisation acoustique de la mousse d'Inox avec une cavité de 10 mm</i>	41

c- Étude de la symétrie de la réponse de l'échantillon en mousse d'Inox.....	42
5) Comparaison entre les mousses d'Inox et de Nickel	42
6) Conclusion.....	43
V. CARACTÉRISATION PHYSIQUE	45
1) Validation préliminaire des caractérisations	47
a- Validation pour les mousses de Nickel	47
b- Validation pour les mousses d'Inox	49
2) Nouvelle caractérisation des mousses d'Inox	52
3) Validation de la caractérisation des échantillons de 2 et 4mm	53
a- Validation pour les échantillons de 4 mm d'épaisseur.....	53
b- Validation pour les échantillons à 2 mm d'épaisseur :.....	54
c- Caractérisation inverse par un modèle de double porosité.....	56
d- Caractérisation inverse par un modèle de plaque perforée	58
E- Validation des résultats de caractérisation de la mousse d'Inox en tant que plaque perforée	60
4) Conclusion générale	62
VI. SIMULATION	63
1) Concepts intégrant la mousse de Nickel	63
a- Concept à un degré de liberté (<i>SDOF</i>)	63
b- Concept à deux degrés de liberté (<i>1 DOF avec écran résistif</i>).....	66
c- Comparaison entre le concept 5 et un <i>liner</i> conventionnel <i>1DOF</i> avec écran résistif ..	68
2) Modélisation et optimisation des mousses de Nickel étudiées	69
3) Simulation de concepts intégrant la mousse d'Inox.....	77
a- Concept à un seul degré de liberté (Figure VI.12).....	77
b- Concept à deux degrés de liberté (Figure VI.14)	79
VII. CONCLUSION	82
Références	85

LISTE DES FIGURES



Figure I-1: Méthodologie de recherche	5
Figure I-2: Exemples de concepts de <i>liner</i> avec la mousse.....	6
Figure II-1: Définition de réaction localisée [Parrott et Jones, 2006]	8
Figure II-2: Phénomène d'absorption	9
Figure II-3: Représentation d'un <i>liner</i> SDOF [Julliard., 2003].....	10
Figure II-4: Représentation du <i>liner</i> de type 2DOF [Julliard., 2003].....	10
Figure II-5: Représentation schématique d'un <i>liner</i> de type 3DOF. [Julliard. 2006]	10
Figure II-6: Différence typique entre l'absorption large (trait plein) bande et sélective (trait pointillé)	13
Figure II-7: Mousse métallique à base de sphères soudées [Gasser <i>et al.</i> , 2004]	14
Figure III-1: Représentation de matériaux à porosité fermé et ouverte.....	17
Figure III-2: Exemple typique de la microstructure d'une mousse métallique	18
Figure III-3: Différentes méthodes de fabrication des mousses métalliques [Banhart, 2001] ..	18
Figure III-4: Les effets thermiques  et visqueux  dans un matériau poreux.....	22
Figure IV-1: Représentation 3D des éprouvettes	27
Figure IV-2: Microstructure de la mousse de Nickel fabriquée par l'IMI	28
Figure IV-3: Tube de Kundt	30
Figure IV-4: Mesures acoustiques de l'échantillon de Nickel à petits pores (P)	32
Figure IV-5: Effet du grade sur la réponse acoustique des mousses de Nickel avec un fond rigide et à 130dB	33
Figure IV-6: Résonateur de cavité.....	34
Figure IV-7: Mesures acoustiques de l'échantillon de Nickel à petits pores avec cavité	35
Figure IV-8: Effet du grade sur la réponse acoustiques des mousses de Nickel avec cavité et à 130dB	36
Figure IV-9: Symétrie de la réponse acoustique du Nickel.....	37
Figure IV-10: Effet de la cavité sur la réponse acoustique des mousses de Nickel à 140dB....	38
Figure IV-11: Mesures acoustiques de l'échantillon d'Inox à gros pores (G)	39
Figure IV-12: Effet du grade sur la réponse acoustique des mousses d'Inox avec un fond rigide et à 130dB.....	40
Figure IV-13: Effet de la cavité sur la réponse acoustique des mousses d'Inox à 140dB.....	41
Figure IV-14: Symétrie de la réponse acoustique de l'Inox à 140dB	42
Figure IV-15: Effet du matériau sur la résistance.....	43
Figure V-1: Principe de fonctionnement de Foam-X	45
Figure V-2: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon de Nickel de 12 mm d'épaisseur, sans cavité	48
Figure V-3: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon de Nickel de 12 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité.....	48
Figure V-4: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 12 mm d'épaisseur, sans cavité	49
Figure V-5: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 12 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité.....	50
Figure V-6: Forme idéale de la courbe d'absorption pour l'inversion avec Foam-X.....	51
Figure V-7: Profondeur de pénétration.....	51

Figure V-8: Microstructure de la mousse d'Inox avec un grossissement de 8 fois	51
Figure V-9: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 4 mm d'épaisseur, sans cavité	53
Figure V-10: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 4 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité	54
Figure V-11: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, sans cavité	55
Figure V-12: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité	55
Figure V-13: Illustration de l'importance de l'épaisseur au niveau de l'absorption	56
Figure V-14: Microstructure de l'Inox avec grossissement de 8 fois, (a) : échantillon 2 mm, (b) : échantillon 4 mm	56
Figure V-15: Caractérisation double porosité des mousses d'Inox de 2 mm d'épaisseur	57
Figure V-16: Comparaison mesure versus simulation double porosité (<i>Nova</i>) sans cavité	58
Figure V-17: Résultat de caractérisation par inversion avec le modèle d'Atalla-Sgard pour deux cavités, a) 10mm et b) 50mm	59
Figure V-18: Représentation de la mousse d'Inox en tant que plaque perforée, (a) : taille moyenne des pores 0,284 mm, (b) : taille de perforation 0,26 mm	60
Figure V-19: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité	61
Figure V-20: Comparaison mesure versus simulation (<i>Nova</i>) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, avec 50 mm de cavité	61
Figure VI-1: <i>Liner</i> conventionnel à 1 degré de liberté (SDOF) vs 3 concepts équivalents à base de mousse de Nickel	63
Figure VI-2: Comparaison des performances acoustiques concepts a, b et c versus <i>liner</i> HC-MPPB	65
Figure VI-3: Différents concepts à deux degrés de libertés	66
Figure VI-4: Comparaison des performances acoustiques des différents concepts	67
Figure VI-5: Comparaison des performances acoustiques du concept 5 versus le <i>liner</i> conventionnel HC2-MPPA	68
Figure VI-6: microstructure d'une mousse en dentelle de l'IMI, (a) : 20X, (b) : 50X	70
Figure VI-7: Modélisation géométrique des mousses en dentelle de l'IMI	71
Figure VI-8: Représentation d'une cellule périodique et la discrétisation	73
Figure VI-9: Variation de la résistivité en fonction du rayon de pore	75
Figure VI-10: Comparaison des performances acoustiques du concept b : mousse expérimentale versus mousse optimisée (R pore = 60 micron)	76
Figure VI-11: Comparaison des performances acoustiques du concept 5 : mousse expérimentale versus mousse optimisée (R pore = 60 microns)	76
Figure VI-12: Concept à un seul degré de liberté	77
Figure VI-13: Comparaison des performances de nos concepts avec les mesures MPPB à 135dB	78
Figure VI-14: Concept à deux degrés de liberté	79
Figure VI-15: Comparaison des performances acoustiques pour différents concepts DDOF ..	80
Figure VI-16: Comparaison des performances acoustiques entre le concept 4 et un DDOF conventionnel	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1: Caractéristiques du tube de Kundt	30
Tableau V.1: Mesure directe de la porosité et la résistivité.....	46
Tableau V.2: Caractérisation inverse par <i>Foam-X</i> des mousses de Nickel à petits pores.....	46
Tableau V.3: Caractérisation des mousses d'Inox à gros pores	47
Tableau V.4: Limite pour les différents paramètres macroscopiques	52
Tableau V.5: Comparaison entre la caractérisation des échantillons de 12 mm et celle avec une épaisseur de 2 et 4 mm.	52
Tableau V.6: Caractérisation de la mousse en tant que plaque perforée avec différents modèles	60
Tableau V.7: Valeurs moyennes des propriétés physiques de la mousse de Nickel	62
Tableau V.8: Valeurs moyennes de la caractérisation de l'Inox en tant que plaque perforée ...	62
Tableau VI.1: Constitution et dimension des différents concepts <i>SDOF</i>	64
Tableau VI.2: Propriétés de la plaque perforée <i>MPPB</i>	64
Tableau VI.3: Masse surfacique des différents concepts	65
Tableau VI.4: Constitution et dimension des concepts à deux degrés de liberté <i>1 DOF</i> avec écran résistif.....	67
Tableau VI.5: Propriétés de la plaque perforée <i>MPPA</i>	67
Tableau VI.6: Comparaison des masses surfaciques du concept 5 et du HC2-MPPA.....	68
Tableau VI.7: Propriétés microstructurales des mousses en Cuivre	70
Tableau VI.8: Caractérisation macroscopique des mousses en Cuivre	70
Tableau VI.9: Relation micro-macro.....	71
Tableau VI.10: Résultats de <i>Panneton</i> [Panneton, 2001].....	72
Tableau VI.11: Résultats d' <i>Emmanulle GROS</i> [Gros, 2006]	72
Tableau VI.12: Comparaison entre le modèle et les résultats de caractérisation par inversion	74
Tableau VI.13: Caractéristiques de la mousse et de la plaque <i>MPPB</i>	77
Tableau VI.14: Constitution et dimension des différents concepts à un degré de liberté <i>SDOF</i>	78
Tableau VI.15: Masse surfacique des différents concepts	79
Tableau VI.16: Constitution et dimension des différents concepts à deux degrés de liberté <i>DDOF</i>	79
Tableau VI.17: Minima et maxima du coefficient d'absorption (α) des différents concepts	80
Tableau VI.18: Comparaison du poids entre le concept 4 et le <i>DDOF-4B</i>	81

I. INTRODUCTION

1) Mise en contexte et motivation de l'étude

De nos jours, les constructeurs aéronautiques sont de plus en plus sensibles aux problèmes liés à la nuisance sonore due aux réacteurs des avions. Cette préoccupation devient de plus en plus légitime vue l'importance du trafic aérien, du confort exigé par les passagers et de la proximité des aéroports avec les milieux urbains. Le niveau de bruit engendré par un avion est proportionnel à l'ampleur de l'appareil et au type de moteur, et pour cela chaque avion est pourvu d'un certificat acoustique affichant ses prestations sonores dans des conditions standards. Ce certificat permet de répartir les avions en différentes classes. Suite à la convention internationale de Chicago de 1944, qui fut à l'origine de la création de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), le document annexe 16 de la convention relative à l'aviation civile internationale a été établi en 1971 [Norme OACI : Les 13 chapitres de l'annexe 16, VOL.1, Bruit Des Aéronefs]. Cette annexe répartit les avions en différents chapitres selon leurs performances acoustiques en prenant en compte l'ancienneté de l'appareil, le poids maximum au décollage et le niveau de certification acoustique.

Pour limiter les nuisances sonores, des mesures ont été prises au fil des ans. En effet, l'OACI adopte des normes plus strictes, ce qui entraîne en conséquence le retrait progressif des avions les plus bruyants. Parmi ces règles, on distingue la mise en place de la taxe sur les nuisances sonores qui pénalise financièrement les compagnies qui utilisent des avions bruyants.

Les nouvelles exigences acoustiques, qui sont de plus en plus sévères, font que les motoristes les plus performants essayent d'innover et d'adapter de nouvelles technologies pour mieux absorber les vibrations et le bruit. Pour cela, l'entreprise *Pratt & Whitney Canada* (P&WC) cherche à adapter de nouvelles technologies pour remédier aux problèmes sonores générés par les nouveaux moteurs.

2) Définition du projet de recherche

Notre étude s'intègre dans le projet *ACOU-1* du Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec (*CRIAQ*). Ce projet est cofinancé par *P&WC*, le *CRIAQ* et le Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada (*CRSNG*) pour

une durée de trois ans, et en collaboration avec l'université de Sherbrooke et l'Institut des Matériaux Industriels (*IMI*).

Le projet *ACOU-1* vise le développement de nouvelles technologies et d'une expertise locale dans la fabrication et la caractérisation de traitements acoustiques (*liners*) de nacelle. Le succès de ce projet passera par :

- (i) le développement de nouveaux concepts de traitements acoustiques pour nacelle;
- (ii) la modélisation analytique et numérique de ces traitements;
- (iii) le couplage de ces modélisations à des outils de simulation de la propagation sonore de nacelles.

Le préalable au succès de ce projet est la réalisation d'un banc de tests local (tube d'impédance à haut niveau sonore, résistivimètre à grand débit) pour la caractérisation d'échantillons plans et courbés (c.-à-d. panneaux de nacelle).

Cette maîtrise s'intéresse au premier objectif qui consiste à développer de nouveaux concepts de traitements acoustiques pour nacelle. En effet, pendant les dernières années, les *liners* ont constitué une solution pertinente pour l'absorption sélective en fréquence, mais l'inconvénient de cette technologie réside dans le fait que l'absorption se fait sur une bande de fréquences limitée. C'est-à-dire que pour une bande de fréquences très large ou pour des traitements de plusieurs bandes de fréquences leur efficacité est mise en cause.

Les exigences acoustiques, qui sont de plus en plus sévères, incitent les motoristes à chercher de nouvelles technologies pour remédier aux limitations des *liners* et avoir ainsi une absorption large bande. Les mousses métalliques à porosité ouverte fabriquées par l'*IMI* semblent être de bonnes candidates pour notre application, d'où notre intérêt à mieux les étudier et montrer ainsi leur potentiel d'utilisation dans les *liners* de moteurs d'avions.

3) Objectif

Depuis longtemps, on utilise les bicouches formées d'une plaque perforée collée à un matériau en nid d'abeille comme absorbeur sonore dans les nacelles de turboréacteur. Ce bicouche forme un résonateur d'Helmholtz à un degré de liberté qui absorbe le son efficacement dans une bande fréquentielle restreinte autour de la fréquence du résonateur. On peut optimiser leur efficacité en superposant typiquement deux ou trois bicouches en série afin d'obtenir des systèmes à 2 ou 3 degrés de liberté. Ainsi on peut absorber sur plus d'une bande

de fréquences, sans toutefois avoir une absorption acoustique large bande (i.e., sur presque toute la gamme des fréquences audibles).

La faiblesse de cette technologie au niveau de l'absorption large bande incite à chercher de nouvelles solutions. La mousse métallique à porosité ouverte s'avère être parmi les bonnes candidates pour s'intégrer aux *liners* et leur conférer une absorption acoustique large bande.

Dans ce contexte, l'objectif global visé par ce travail de maîtrise est d'étudier la faisabilité d'utilisation de mousses métalliques dans les traitements acoustiques des nacelles de moteur d'avion.

Les objectifs spécifiques sont :

- La vérification de l'efficacité des mousses métalliques en tant qu'absorbeurs large bande et de la linéarité de leur réponse acoustique.
- Trouver des modèles simples permettant de prévoir le comportement acoustique des mousses métalliques faits de Nickel et d'acier Inoxydable.
- Mise en place des constituants d'un *liner* intégrant la mousse métallique et présentant un certain avantage par rapport au *liner* conventionnel. Ce nouveau *liner* pourra concurrencer les *liners* déjà utilisés soit au niveau des performances acoustiques, du poids ou du coût de fabrication.

4) Problématique scientifique et technologique

a- Problématique technologique

Les traitements acoustiques utilisés de nos jours sont composés d'une succession de plaques perforées, de cavités et de plaque rigide. Ils constituent un ensemble de résonateurs de Helmholtz. Ce type de *liner* absorbe en général sur seulement une, deux ou trois octaves. À ce jour, pour un traitement large bande, il n'existe presque pas de solution. Les motoristes doivent donc développer de nouveaux *liners* qui pourront absorber le son sur une large bande. L'intégration des mousses métalliques dans les *liners* pourrait être la solution pour remédier à la non linéarité et à l'absorption sélective de ces derniers.

Dans le cadre de cette maîtrise, quelques concepts de *liner* intégrant la mousse métallique seront étudiés tout en répondant aux attentes au niveau des performances acoustiques.

En plus des performances acoustiques, le choix du matériau qui intégrera les *liners* dépendra aussi de son coût de production à grande échelle, de ses performances mécaniques comme la tenue à la fatigue et à la chaleur et de la facilité de sa maintenance.

b- Problématique scientifique

Afin de trouver le bon concept intégrant la mousse métallique et pour dimensionner ses constituants, il est crucial d'effectuer des simulations afin de pouvoir comparer les performances de plusieurs concepts et de choisir les plus efficaces.

Il existe actuellement une littérature abondante sur les *liners* à un, deux et trois degrés de liberté. Par contre, peu d'articles étudient l'application de traitement large bande dans les moteurs d'avions. Il faut donc mettre en place des outils théoriques pour simuler ces traitements large bande pour les nacelles. Ces outils nous permettront de valider le potentiel de ces matériaux sur le plan acoustique.

5) Méthodologie

La méthodologie adoptée pour répondre aux objectifs du projet de maîtrise est représentée à la Figure I.1. Les étapes de la méthodologie sont décrites à la suite de cette figure.

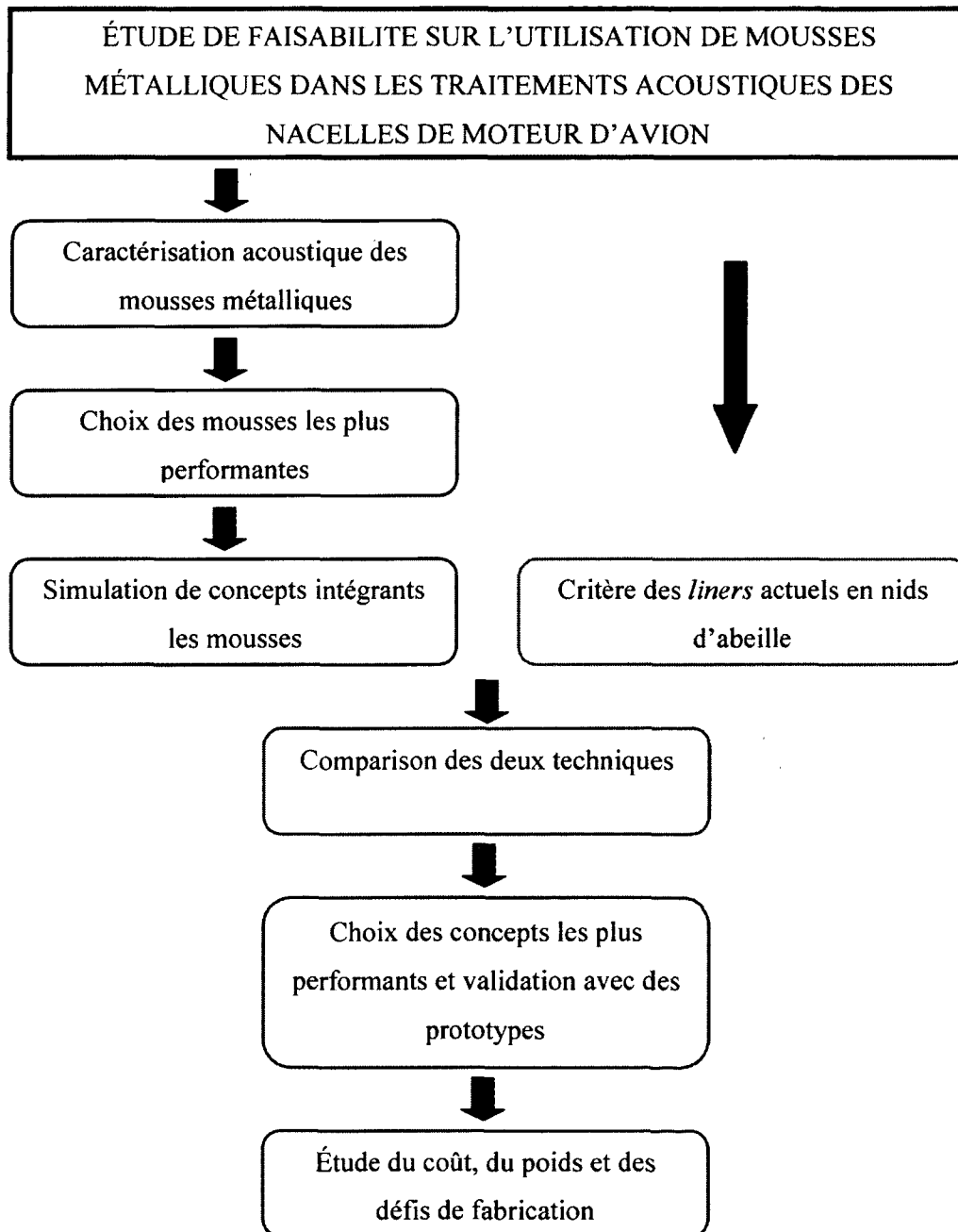


Figure I-1: Méthodologie de recherche

- Caractérisation acoustique des mousses :

Une caractérisation des propriétés acoustiques (i.e. coefficient d'absorption sonore, impédance acoustique de surface) et physiques (porosité, résistivité statique à l'écoulement, tortuosité, longueur caractéristique visqueuse et longueur caractéristique thermique) des mousses métalliques sera réalisée au laboratoire de caractérisation des matériaux (LCMA).

- Choix des mousses les plus performantes :

À partir de la caractérisation acoustique on choisira les mousses métalliques présentant les meilleurs résultats au niveau de l'absorption sonore.

- Simulation de concepts de *liners* intégrant les mousses :

Cette étape consiste à choisir un modèle mathématique permettant de simuler le comportement acoustique des mousses et d'éventuellement l'adapter aux mousses étudiées afin de simuler différents concepts de *liners*. Ces concepts intégreront les mousses métalliques et s'inspireront de la technologie des *liners* existants. La Figure I.2 suivante montre trois exemples de concepts qui seront simulés.

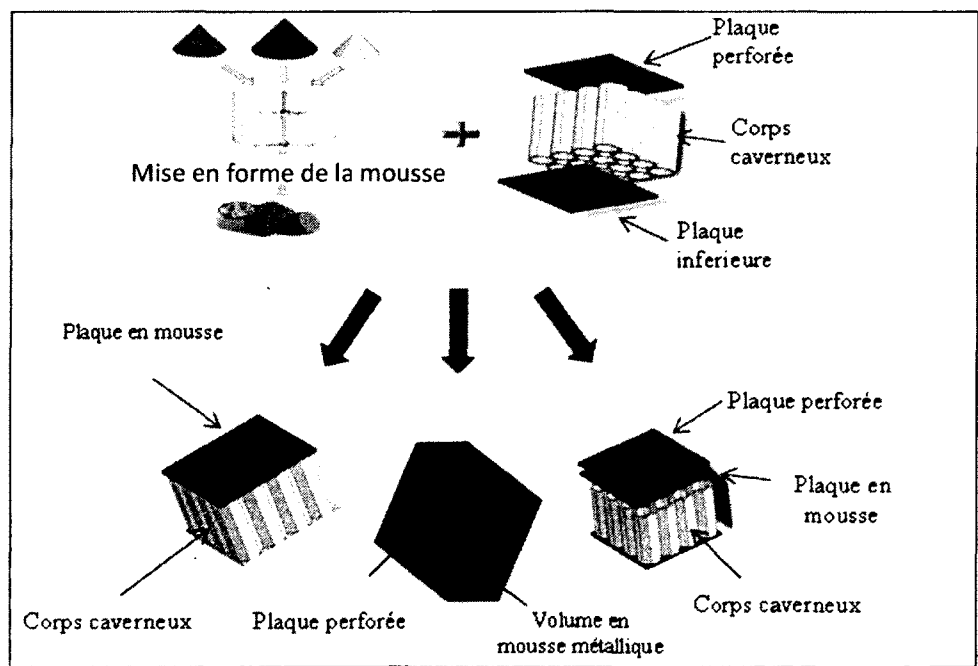


Figure I-2: Exemples de concepts de *liner* avec la mousse

- Sélection des concepts les plus efficaces:

L'étude des caractéristiques des *liners* en forme de nid d'abeille nous permettra de déterminer si les nouveaux concepts sont plus performants et s'ils pourraient remédier aux problèmes de non linéarité et d'absorption sélective.

- Étude du coût, du poids et des défis de fabrication :

À partir des concepts simulés, on choisira ceux qui sont les plus prometteurs pour évaluer leur faisabilité au point de vue technologie de fabrication et coût.

II. ÉTAT DES CONNAISSANCES

1) *Liners* à absorption sélective

a- Absorption sonore dans les liners à absorption sélective

Dans cette partie on discutera des *liners* couramment utilisés en aéronautique et qui sont appelés *liners* à réaction localisée [Bielak *et al.*, 1999] [Motsinger et Kraft, 1991a]. Cette appellation est donnée à un matériau lorsque celui-ci est constitué de cavités non connectées dont la section est négligeable devant la longueur d'onde. Dans ce cas, l'incidence de l'excitation acoustique n'est pas très importante puisque la propagation dans celui-ci se fait suivant la normale à la surface. La réponse de la surface à une excitation est alors locale : les points de surface ont une réponse qui est indépendante les uns des autres. Cette définition de réaction localisée est illustrée dans la Figure II.1.

Les *liners* sont généralement formés successivement d'une plaque inférieure rigide, d'une couche composée de cavités en forme de nid d'abeille et d'une couche supérieure perforée. L'ensemble de ces couches permet de dissiper l'énergie sous forme de chaleur et d'atténuer ainsi l'onde sonore.

Pour cela la couche perforée doit avoir une épaisseur très faible par rapport au quart de la longueur d'onde ($\lambda/4$), et, pour éviter les propagations transversales, les dimensions transversales des cavités doivent être inférieures à $\lambda/2$. Tel que le montre la Figure II.2, pour qu'il y ait maximum d'absorption il faut nécessairement que la pression au niveau de la face intérieure de la couche perforée soit nulle (i.e. $P_2 = 0$), d'où l'obligation d'espacer la plaque rigide de $\lambda/4$. On définit la résistivité du milieu poreux par : $\sigma = (P_1 - P_2) / Ve$, où e est l'épaisseur de la plaque perforée et V est la vitesse acoustique de l'onde à incidence normale. On peut calculer l'impédance de surface de la face supérieure à $\lambda/4$: $Z_s = P_1 / V = e \cdot \sigma$.

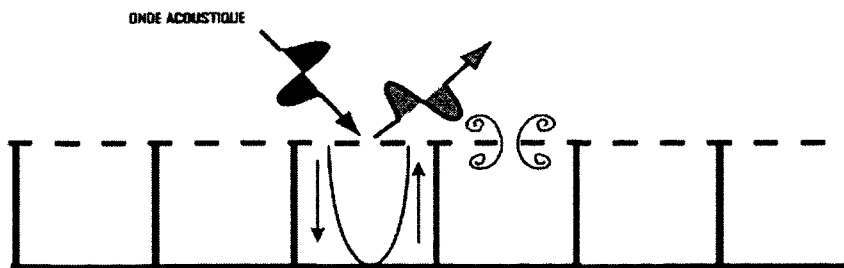


Figure II-1: Définition de réaction localisée [Parrott et Jones, 2006]

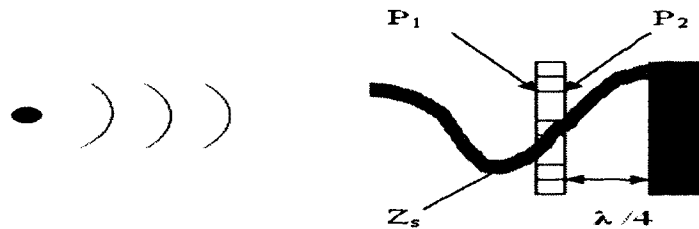


Figure II-2: Phénomène d'absorption

b- Différents types de liners à absorption sélective

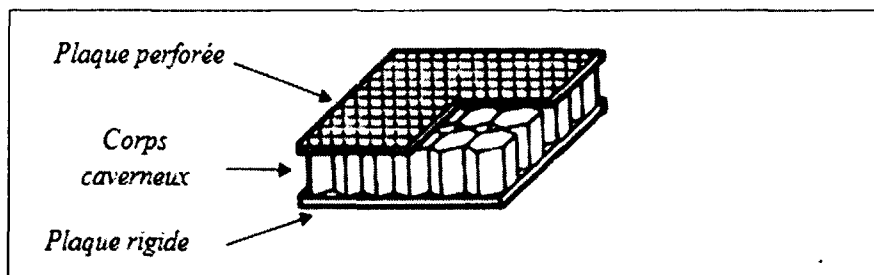
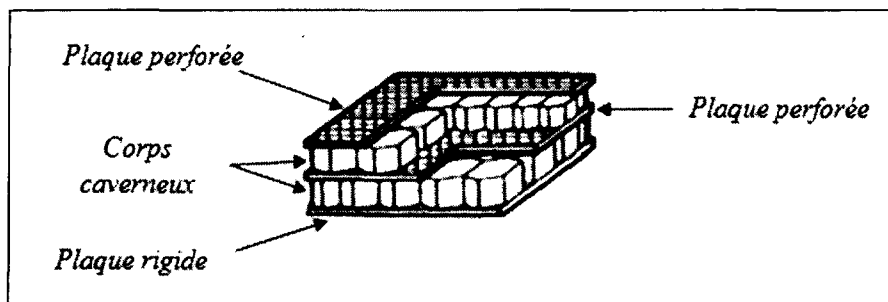
Les traitements acoustiques à un degré de liberté (*SDOF*: *Single Degree Of freedom*)

Comme le montre la Figure II.3, les *SDOF* sont constitués d'une couche inférieure rigide, d'une couche supérieure perforée et, entre les deux, d'un corps caverneux en forme de nid d'abeille. L'assemblage de ces trois constituants représente un ensemble de résonateurs de Helmholtz.

En plus de leurs bonnes propriétés mécaniques, les propriétés résonnantes des *SDOF* permettent d'atténuer les problèmes sonores sur une octave (absorption sélective). Selon la taille des cavités et des perforations, le traitement peut être résistif ou réactif. La sélectivité de leur absorption constitue l'avantage de cette technique en permettant de cibler les raies à atténuer. Au même temps cette sélectivité est négative, étant donné que le traitement est peu efficace sur une large bande. Les *SDOF* aero, sont typiquement efficaces sur des fréquences allant de 1000 à 2500Hz [Bielak *et al.*, 1999].

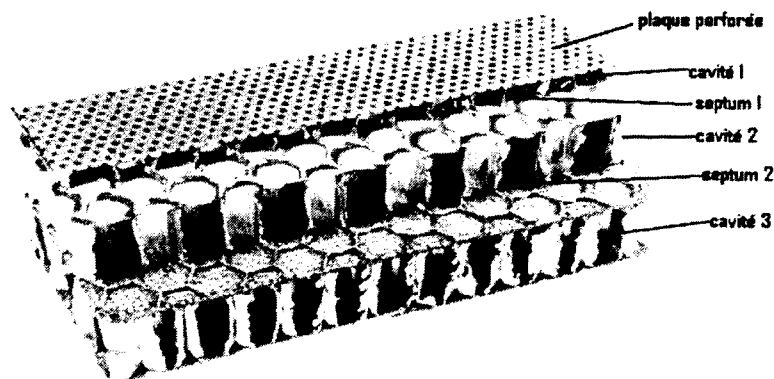
Les traitements acoustiques à deux degré de liberté (*2DOF*)

Comme pour les *SDOF*, ces panneaux sont formés d'une couche inférieure rigide et d'une couche supérieure perforée, mais entre les deux on trouve deux couches de corps caverneux séparées par une peau intermédiaire perforée appelée septum. L'ensemble constitue un double résonateur. L'avantage du *2DOF* est le fait qu'il permet d'atténuer le bruit sur deux octaves. Son efficacité est bonne sur une plage de fréquence typique allant de 800 à 4000Hz [Bielak *et al.*, 1999]. Cette gamme de fréquence est plus large que celle du *SDOF*, mais de nos jours elle reste insuffisante face à un spectre de bruit étendu. La figure II.4 représente un panneau *2DOF*.

Figure II-3: Représentation d'un *liner* SDOF [Julliard., 2003]Figure II-4: Représentation du *liner* de type 2DOF [Julliard., 2003]

Les traitements acoustiques à trois degré de liberté (3DOF)

On trouve aussi les 3DOF, représentés sur la Figure II.5, qui sont constitués de trois couches de corps caverneux séparées par deux septums. Ce système couvre trois octaves, mais la faiblesse de cette technique réside dans son volume qui devient assez encombrant surtout en aéronautique où le poids est un paramètre très important, en plus de son coût de fabrication qui est plus élevé. Un désavantage important de ces absorbants sélectifs est l'assemblage par colle de leurs différentes couches qui peut être difficile et surtout le bouchage des perforations. Ceci est d'autant plus vrai plus il y a de couches.

Figure II-5: Représentation schématique d'un *liner* de type 3DOF. [Julliard. 2006]

c- Effets linéaire et non linéaire des liners sélectifs

Les *liners* sont caractérisés par leur impédance acoustique complexe. La partie réelle de l'impédance est appelée résistance (R) et la partie imaginaire est la réactance (X). La résistance tient compte des dissipations par effet visco-thermique. La réactance est en relation directe avec la dimension de la cavité. Certains *liners* ont une réponse acoustique linéaire et d'autres non-linéaires. On parle de réponse linéaire lorsque la résistance reste uniforme quel que soit le niveau d'excitation. Le niveau de pression sonore *SPL* atteint un maximum à 191dB. Cette dernière peut être représentée par des équations classiques. La réponse acoustique est dite non linéaire lorsque la réponse en impédance dépend de l'amplitude de l'onde et de la vitesse particulière. À ces deux types de *liners* il existe des modèles qui permettent de calculer leur impédance.

d- Modèles pour les liners linéaires

Dans cette partie nous allons exposer brièvement quatre modèles d'impédance pour les *liners* linéaire composés d'une plaque perforée. On commencera par le modèle fluide équivalent pour passer au modèle d'*Atalla-Sgard* [Atalla et Sgard, 2007] et celui de *Maa* [Maa, 1975, 1987, 1988] et finir avec le modèle d'*Allard* [Allard, 1993].

Dans le modèle du fluide équivalent, on considère que le squelette du poreux reste immobile et qu'une seule onde de compression se propage dans la phase fluide du matériau. Ce modèle est considéré comme semi-phénoménologique : les réponses approchées du fluide saturant le milieu poreux soumis à l'excitation acoustique sont représentées par des fonctions mathématiques.

Pour définir les différents mécanismes de dissipation dans un matériau poreux, le comportement de celui-ci est assimilé à un fluide équivalent avec une masse volumique et un module de compression équivalents.

Le modèle fluide équivalent : *Johnson-Champoux-Allard* [Johnson *et al.*, 1987; Champoux et Allard, 1991], considère les cinq paramètres suivants : porosité, résistivité, tortuosité, longueurs caractéristiques visqueuses et thermiques. Ce modèle est corrigé par *Atalla et Sgard*, en modifiant l'expression de la tortuosité et ainsi prendre en compte les effets de masse au niveau des pores de la plaque perforée supérieure [Atalla et Sgard, 2007].

Le modèle de *Maa* [Maa, 1975, 1987, 1988] permet de déterminer l'impédance des plaques micro-perforées, en considérant les perforations comme des tubes très courts et étroits. La propagation du son dans des tubes étroits a été étudiée par *Rayleigh* [Rayleigh, 1967]. L'étude de ce dernier est simplifiée par *Crandall* [Crandall, 1926] dans le cas des tubes très courts dont la longueur est comparable à la longueur d'onde. À partir des solutions de *Crandall*, *Maa* a proposé un modèle d'impédance normalisé en apportant des corrections de longueurs [Maa, 1975].

Dans le modèle d'*Allard* [Allard, 1993], le *liner* est considéré comme un ensemble de résonateur de Helmholtz, ce résonateur absorbe les raies en basse fréquence, et leur effet est maximal lorsque la partie imaginaire de l'impédance est nulle. *Allard* propose de séparer le problème en deux parties : dans la première partie, il traite l'impédance de surface située juste à l'entrée des perforations et dans la deuxième, il donne l'expression de l'impédance au niveau de la cavité juste à l'arrière des perforations. L'impédance totale est en fonction de ces deux impédances.

e- Modèles pour les liners non linéaires

Dans cette partie nous allons nous contenter d'exposer brièvement deux modèles d'impédance pour les *liners* non linéaires composés d'une plaque perforée. Le premier modèle est celui de Motsinger et Kraft, le deuxième est celui de Crandall et Melling.

Pour le modèle de Motsinger et Kraft [Motsinger et Kraft, 1991b], le fluide est considéré comme incompressible et les termes sont linéaires suivant un écoulement de poiseuille. La résistance à l'écoulement du fluide est assimilée à la résistance acoustique. Cette dernière est composée de trois termes. Un premier terme pour l'écoulement linéaire visqueux, un deuxième qui tient compte des pertes causées par les turbulences, et un troisième qui correspond à l'écoulement tangentiel à la surface du *liner*. La faiblesse de ce modèle vient du fait que l'impédance ne varie pas avec la fréquence.

Le modèle de Crandall est au début un modèle linéaire. Il se sert de la théorie de la propagation des ondes planes dans un tube tout en tenant compte des effets visqueux. Crandall fait l'hypothèse que la propagation de l'onde dans un orifice est isotherme. Ceci lui permet d'utiliser une viscosité effective à la place d'une absolue pour représenter les effets thermiques résultants.

Melling [Melling, 1973] a modifié l'expression de la résistance linéaire d'une plaque perforée en ajoutant un terme non linéaire. Pour ce dernier les paramètres acoustiques sont remplacés par leurs valeurs moyennes. En intégrant l'expression de la résistance non linéaire de Melling dans celle de la résistance de Crandall, on obtient un modèle de Crandall et Melling [Yu *et al.*, 1996] qui tient compte de la composante non linéaire de la résistance. La validation expérimentale de ce modèle montre que pour une valeur de ratio « hauteur de cavité-diamètre de perforation » supérieur à 0.80, le modèle n'est plus valide.

2) Traitement acoustique à large bande d'absorption

a- Avantages

Contrairement aux *liners* conventionnels utilisés dans les nacelles de moteur d'avion, les absorbeurs large bande sont efficaces sur une grande plage de fréquences. Cette propriété est très intéressante pour remédier à la réponse non linéaire des traitements conventionnels utilisant des plaques perforées. La Figure II.6 illustre la différence typique entre les deux types d'absorbeur sonore. On constate bien que pour la courbe rouge correspondant à une absorption large bande, le coefficient d'absorption reste élevé pour une plage de fréquence assez large, par contre pour l'absorbeur sélectif, en pointillé, l'absorption est élevée seulement pour une plage de fréquence assez restreinte autour du point de résonance.

À partir de ce constat, il est clair qu'à cause de la non-linéarité, la fréquence d'absorption maximale varie avec le niveau ce qui pose problème lorsqu'on veut atténuer une raie particulière.

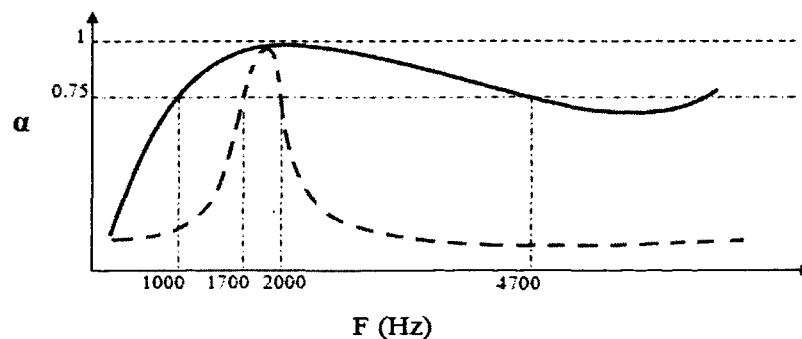


Figure II-6: Différence typique entre l'absorption large (trait plein) bande et sélective (trait pointillé)

b- Absorbeurs large bande

On trouve sur le marché plusieurs absorbants acoustiques large bande comme les mousses polymériques et les matériaux fibreux. Ces matériaux offrent de très bonnes caractéristiques acoustiques, mais pour notre utilisation ces derniers ne seront pas en mesure de répondre à nos attentes au niveau des propriétés mécaniques et de la tenue à la chaleur.

Quelques études se sont penchées sur ce problème pour essayer de trouver des absorbeurs large bande dont les caractéristiques mécaniques sont compatibles avec l'environnement sévère de travail d'un *liner*.

Parmi les quelques solutions retrouvées, on peut citer :

- Les mousses métalliques à base de sphères [Gasser, (2003)]

Un bon absorbeur de bruit conçu pour les nacelles d'avions doit avoir de bonnes caractéristiques mécaniques (rigidité, tenue à la chaleur) et permettre à l'onde acoustique de le pénétrer, ce qui nécessite des pores ouverts.

Malheureusement ces deux conditions sont difficiles à combiner. Les ingénieurs de l'ONERA ont trouvé une solution qui pourrait combiner la rigidité et le cloisonnement des pores ouverts. L'idée est de fabriquer des sphères vides dont les parois sont perforées, et qui vont être empilées comme des oranges sur l'égal de l'épicier. On peut voir cet empilement sur la Figure II.7.

Cet empilement de sphères peut s'avérer suffisamment solide pour constituer le cœur d'une structure sandwich, mais reste à contrôler la composition et l'empilement. Les sphères sont fabriquées à partir de billes de polystyrène, sur lesquelles on a effectué un dépôt métallique. L'alliage de ce dépôt est un super alliage connu pour sa dureté et sa résistance à la chaleur.

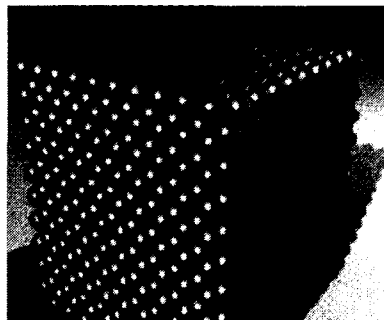


Figure II-7: Mousse métallique à base de sphères soudées [Gasser *et al.*, 2004]

Le procédé prévoit qu'on part d'une multiplicité de corps de base (bille), et pour constituer le matériau les billes seront assemblées par brassage, et pour cela les billes élémentaires sont traitées chimiquement pour recevoir un dépôt de brasure. Un traitement thermique sera réalisé pour le brassage proprement dit.

Les ingénieurs de l'ONERA se sont basés sur des simulations numériques pour vérifier et valider le comportement de ces billes creuses après soudure.

Cette technologie voit son intérêt dans le fait que ce matériau résiste aux hautes températures. Mais dans notre projet, nous allons traiter les parties froides du moteur. Cela n'exige pas une résistance aussi élevée à la température.

- Les mousses métalliques à porosité ouverte [Sutliff et Jones (2008)]

Dans l'étude réalisée par Daniel L. Sutliff et Michael G. Jones, une mousse métallique a été développée et testée avec un turbo réacteur à faible vitesse pour atténuer le bruit du moteur. Ce type de revêtement représente un progrès significatif par rapport aux revêtements traditionnels en raison de la possibilité de le placer à proximité immédiate du rotor.

L'avantage de placer le traitement acoustique dans cette région est la modification du champ acoustique proche, inhibant ainsi les mécanismes de génération de bruit. Cela peut entraîner des niveaux d'atténuations supérieurs à ceux pouvant être atteints dans les nacelles traditionnelles.

La mousse utilisée est à base d'alliage de Cobalt, celle-ci est caractérisée par l'uniformité de ses propriétés acoustiques, sa porosité de 20 à 100 pores par pouce et par sa densité de 6 à 8%.

Le *liner* en mousse métallique est testé en étant placé à plusieurs endroits au niveau de la nacelle. Il s'avère que l'utilisation de ce dernier permet de réduire à terme le nombre de composants du moteur, donc le poids de l'ensemble.

En se basant sur cette étude, les mousses métalliques ont le potentiel pour réduire le bruit du turbo réacteur jusqu'à 4 dB lorsqu'ils sont placés autour du rotor.

3) Conclusion

La revue de la littérature nous a permis de constater que les traitements acoustiques faits de plaques perforées sur nids d'abeille dans des configurations *SDOF*, *2DOF* et *3DOF* sont les traitements usuellement utilisés dans les nacelles de moteurs d'avion pour une

absorption sélective. Des modèles existent pour prédire tant leurs réponses acoustiques linéaires que non linéaires.

La revue nous a permis aussi de constater que peu d'études ont été publiées sur des traitements large bande pour des utilisations dans les nacelles. Les mousses métalliques semblent assez prometteuses. Leur utilisation, peu étudiée, offre un potentiel qui mérite d'être exploré d'avantage.

En ce qui nous concerne, on essayera de bien caractériser une classe de ces matériaux (les mousses métalliques de l'IMI) pour démontrer leur efficacité acoustique. On essayera à la suite de les intégrer dans des prototypes de *liners* pour voir l'interaction de ces mousses avec les composants des *liners* conventionnels.

III. MODÉLISATION DES MOUSSES MÉTALLIQUES

1) Description

Les mousses métalliques sont des matériaux poreux à grand taux de porosité. On distingue deux types de matériaux poreux : ceux à porosité ouverte et ceux à porosité fermée (voir Figure III.1), et dans les deux cas ces matériaux sont composés d'une phase fluide et d'une phase solide appelée aussi matrice. La Figure III.2 représente la microstructure d'une mousse métallique à porosité ouverte.

a- Fabrication

Généralement la fabrication des mousses passe par trois étapes essentielles qui sont la germination, la croissance et l'expansion de bulles de gaz dans un bain ou un liquide réactif [Cunningham et Hilyard, 1994].

Il existe plusieurs méthodes de fabrication des mousses métalliques. Certaines de ces méthodes sont similaires aux techniques de formation des mousses aqueuses ou polymériques, alors que d'autres sont spécifiques pour les mousses métalliques, ces dernières étant basées sur les caractéristiques des métaux (frittage, déposition électrique)

Si on classe ces méthodes selon la façon dont le métal a été transformé, on peut avoir quatre voies qui sont résumées dans la Figure III.3 [Banhart, 2001]:

- métal liquide
- métallurgie des poudres
- composé gazeux ou vapeur de métal
- solution de métal ionisé

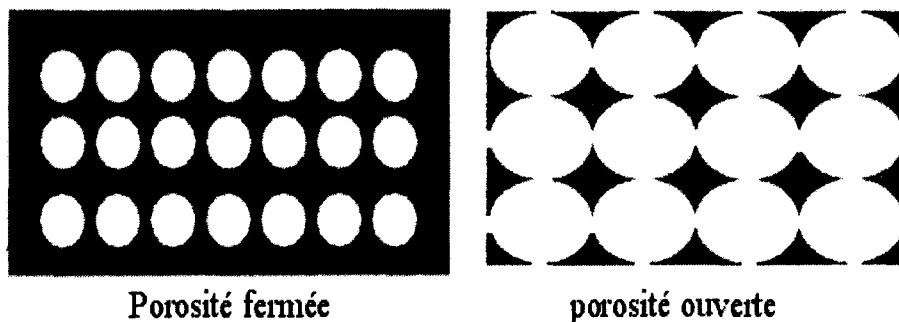


Figure III-1: Représentation de matériaux à porosité fermé et ouverte

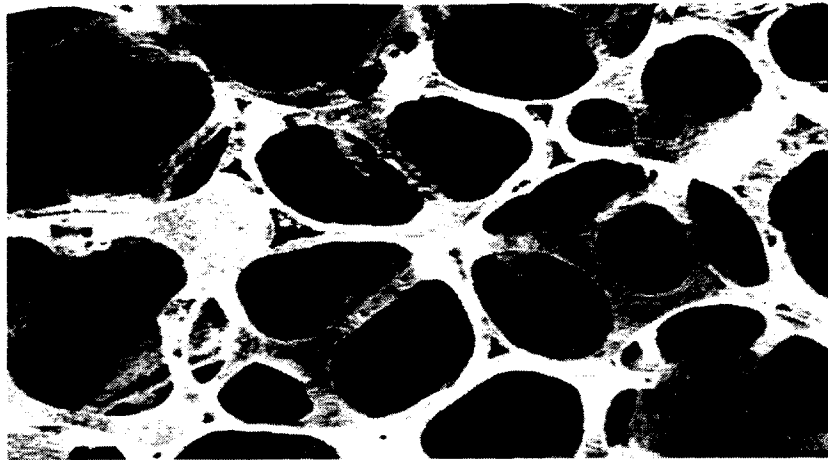


Figure III-2: Exemple typique de la microstructure d'une mousse métallique

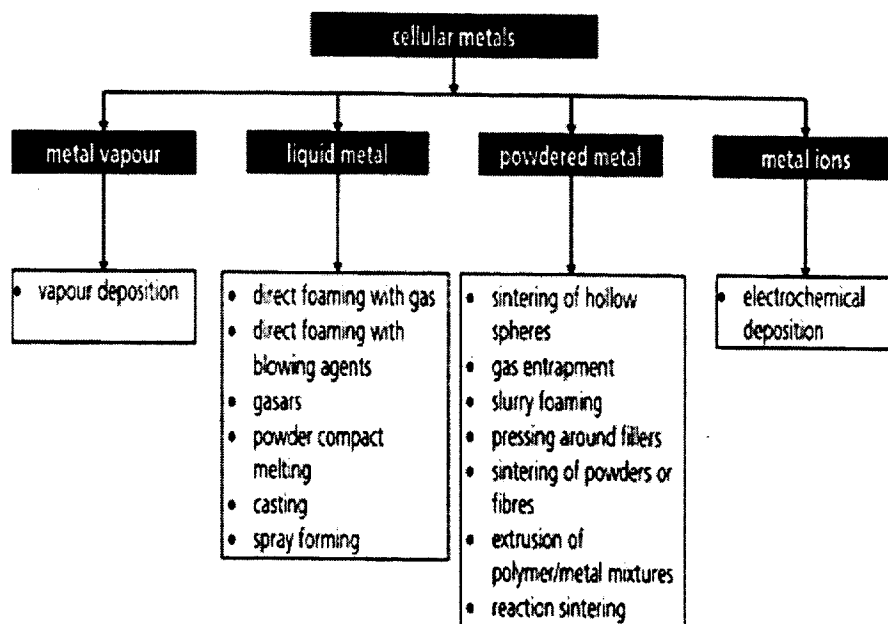


Figure III-3: Différentes méthodes de fabrication des mousses métalliques [Banhart, 2001]

Dans ce qui suit, on va définir brièvement ces quatre voies :

- Métal liquide [Asholt, 1999], [Wood, 1997]: le métal fondu est transformé en mousse soit par l'injection d'air à travers un rotor qui permet d'homogénéiser les bulles de gaz dans le bain, ou par la coulée du métal fondu autour d'un matériau qui laisse sa place

ensuite aux pores, ou encore par ajout d'éléments qui permettent de libérer un agent gonflant à une certaine température.

- **Métallurgie des poudres** [Wubben et Odenbach, 2005], [Baumgärtner *et al.*, 2000]: au lieu du métal en fusion on utilise le métal sous forme de poudre mélangée en général avec un autre agent en poudre. Ce dernier, à une certaine température, éclate et forme les pores.
- **Solution de métal ionisé** : cette technique est initiée à partir d'une solution ionique du métal, celle-ci sera déposée électriquement sur une mousse en polymère qui sera à la suite détruite pour obtenir à la fin une mousse métallique.
- **Composé gazeux ou vapeur de métal** : un métal ou un composé métallique à l'état gazeux est condensé dans une chambre à vide sur un précurseur pour avoir la structure d'une mousse métallique.

En ce qui concerne les mousses métalliques qu'on va étudier, le développement et la fabrication ont été réalisés à l'*Institut des Matériaux Industriels* (IMI) [Lefebvre et Thomas, 2003].

b-Procédé de fabrication des mousses métalliques de l'IMI

Comme on l'a déjà mentionné précédemment, les mousses métalliques peuvent être fabriquées suivant différents procédés. L'un de ces procédés consiste au moussage d'un polymère hautement chargé avec des particules métalliques, ensuite on élimine le polymère et on consolide le matériau métallique restant [Dwivedi et Fauerbach, 2001]. En se basant sur cette technique, un nouveau procédé a été mis en œuvre par les chercheurs de l'IMI [Gauthier *et al.*, 2004]. En effet une poudre métallique, un liant polymérique et un agent moussant sont mélangés à sec. Ce mélange est ensuite moulé pour avoir la forme désirée, puis le résultat est traité thermiquement en trois étapes : moussage dans l'air à 150°C, élimination du polymère dans un four avec un flux d'air chauffé à 500°C, et enfin frittage dans une atmosphère contrôlée, par exemple : (Ar-10% H₂) pendant 2 heures à 3 différentes températures (750°, 825° et 900°C).

Au cours du moussage le liant polymérique fond et enrobe les particules métalliques. Une fois le liant totalement fondu, l'agent moussant se décompose en dégageant du gaz

engendrant l'expansion du mélange. Après cette étape de moussage, on obtient une mousse de polymère chargée avec des particules métalliques.

Le matériau est ensuite traité thermiquement pour éliminer le polymère et avoir ainsi un nouveau matériau entièrement métallique. Ce dernier sera fritté pour favoriser la diffusion et la création de liens métallurgiques entre les particules. Le frittage permet aussi d'améliorer les propriétés mécaniques, de minimiser l'énergie de surface du système et la surface du matériau. Cette amélioration des propriétés mécaniques varie proportionnellement avec l'augmentation de la température de frittage. En effet, pour des températures de frittage élevées, il se crée plus de liens métallurgiques entre les particules métalliques.

Au cours de l'élimination du polymère, une couche d'oxyde se forme sur la surface du matériau métallique. Pour éliminer l'oxydation, le frittage se fait dans une atmosphère réductrice. On remarque une densification du matériau après le frittage, cette densification est d'autant plus grande lorsque la température de frittage augmente.

La surface spécifique du matériau est intimement liée à la porosité et à la structure du matériau. Ces deux dernières dépendent du matériau de base et du procédé de fabrication. Au cours du frittage, la surface spécifique a une variation inversement proportionnelle à la température. Donc si on veut avoir une mousse avec une grande surface spécifique, il faut fritter à basse température.

2) Phénomène de dissipation acoustique dans les matériaux poreux

Les mousses métalliques à porosité fermée sont considérées comme des absorbeurs sonores faibles. En effet pour ce type de matériau on n'a pas de mouvement relatif entre le fluide et la phase solide. Dans ce cas, l'absorption par perte visqueuse et thermique est nulle, et le faible taux d'absorption est dû à l'amortissement structural [Ingard, 1994].

A partir de la théorie de Biot [Biot, 1956], seulement les ondes de cisaillement et de compression élastique se propagent dans une mousse à cellules fermées.

Beaucoup d'études ont traité le problème d'absorption au niveau des mousses métalliques à porosité fermée, en se basant sur des modèles solide avec les propriétés élastiques équivalentes. Ingard [Ingard, 1994] a proposé une méthode pour déterminer les propriétés élastiques équivalentes à partir des celles du matériau formant le squelette et du fluide emprisonné à l'intérieur des cellules fermées.

D'autres théories stipulent que même si le noyau du matériau est formé de cellules fermées, la surface de celui-ci est généralement formée d'irrégularités et de cellules ouvertes. Wojtowicki et Panneton [Wojtowicki et Panneton (2005)] ont élaboré un modèle qui tient compte de l'absorption de surface. Leur travail démontre bien que pour les mousses à cellules fermées l'absorption est composée non seulement de la partie résonnante mais aussi d'une absorption résiduelle de surface.

A partir de ce qu'on vient de voir, on peut dire que l'absorption des mousses à cellules fermées et à matrice rigide est inférieure à celle des mousses polymériques. Ceci est dû principalement au faible coefficient d'amortissement de leur matrice rigide [Han *et al.*, 1997] et à la faible portion de porosité ouverte.

Il existe des méthodes pour améliorer l'absorption de ces matériaux, soit en appliquant une compression sur l'échantillon et ainsi crée des fissurations dans les parois des pores, soit par le perçage de trous ou par la combinaison des deux. Dans les trois cas il s'agit en fait d'ouvrir les pores les uns sur les autres et au milieu environnant. On peut citer les travaux de LU [Lu *et al.*, (2000)] et de Chevillotte [Chevillotte *et al.*, 2010] qui ont travaillé sur des mousses à base d'aluminium et ils ont conclu que le mécanisme d'absorption par perte visqueuse à travers les fissurations est dominant par rapport aux autres types d'absorption.

On ce qui nous concerne, nous allons étudier les mousses à porosité ouverte qui sont connues pour être des bons absorbant sonore large bande. En effet, pour que l'onde soit atténuée, il faut qu'elle passe à travers les pores du matériau, ce qui engendre des dissipations viscothermiques de l'énergie acoustique de l'onde au sein de la structure [Allard et Atalla, 2009]. La partie fluide de ces matériaux est l'air.

On distingue principalement trois types de mécanismes de dissipation de l'énergie sonore dans ces matériaux : le premier, appelé dissipation visqueuse, est dû aux frottements engendrés par le mouvement entre les phases solide et fluide. Le deuxième, appelé dissipation thermique, est dû essentiellement aux changements de pression du fluide qui traverse les pores [Navi et Tornare, 2006] et au fait que la matrice impose une température acoustique nulle sur sa surface mouillée à cause de l'inertie thermique du solide beaucoup plus élevée que celle de l'air. Le troisième, appelé amortissement structural, est dû au mouvement de la structure du matériau. Pour un matériau poroélastique excité par une onde acoustique ce troisième mécanisme de dissipation est négligeable. En plus si la fréquence est supérieure à la limite

basse fréquence, on a un découplage entre les deux phases solide et fluide. Dans ce cas, le matériau poreux est considéré comme un fluide équivalent (modèle rigide ou souple) [Panneton, 2007]. Dans notre cas, puisque les mousses sont métalliques et excitées par des ondes acoustiques, elles seront considérées rigides (i.e., indéformables) et seront modélisées comme des fluides équivalents. Les deux types de dissipation qui nous intéressent sont illustrés dans la Figure III.4, qui suit.

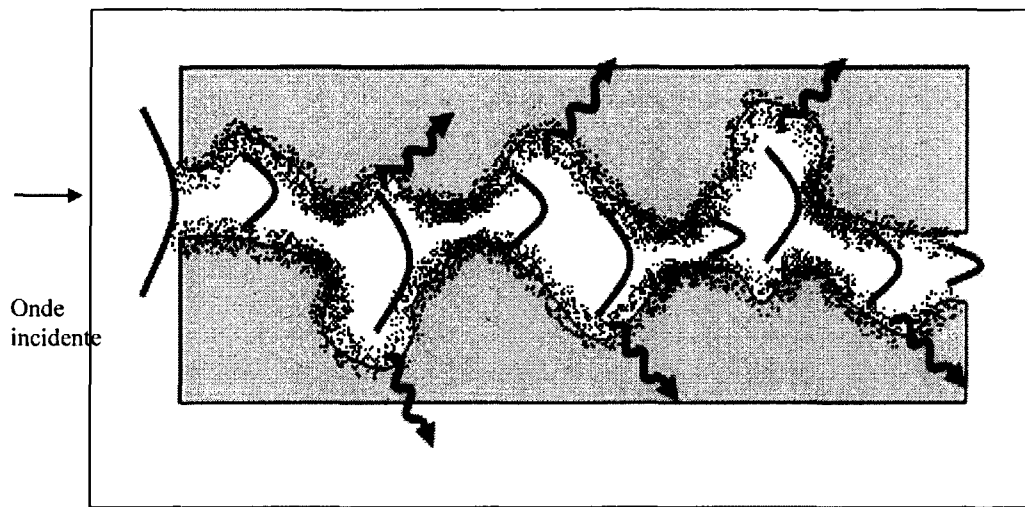


Figure III-4: Les effets thermiques  et visqueux  dans un matériau poreux

3) Propriétés acoustiques des matériaux poreux

Les performances acoustiques d'un matériau poreux sont généralement reliées à sa microstructure, cette dernière peut être décrite en définissant quelques paramètres physiques du matériau :

- La porosité ouverte: définie comme étant le rapport entre le volume de fluide (V_p), en général de l'air, saturant les pores interconnectés et le volume total (V_t) de l'échantillon. Notons que le volume total est la somme des volumes des phases solide et fluide ($V_t = V_p + V_s$).

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} \quad \text{III.1}$$

- La résistance statique à l'écoulement : décrit la chute de pression nécessaire pour provoquer un écoulement à travers le matériau. En pratique, on mesure le flux d'air d'un écoulement laminaire constant Q lorsqu'on impose une différence de pression ΔP aux bornes de l'échantillon d'épaisseur d et d'aire de surface A

$$\sigma = \frac{\Delta P}{Q} \cdot \frac{A}{d} \quad \text{III.2}$$

La résistance statique à l'écoulement σ est exprimée en $N.s.m^{-4}$ ou en rayls/m en système MKS.

- La tortuosité : une première approche stipule que c'est la déviation subie à travers le matériau comparé à un chemin direct. La deuxième approche définit la tortuosité comme la dissipation des vitesses microscopiques \vec{V} autour de leurs moyennes macroscopiques. Dans les deux approches la valeur de la tortuosité est supérieure où égale à 1.

$$\alpha_{\infty} = \frac{\langle \vec{V}^2 \rangle}{\langle \vec{V} \rangle^2} \quad \text{III.3}$$

avec $\langle \rangle$: operateur de moyenne spatiale sur la phase fluide, c'est-a-dire que pour un champ f quelconque nous avons : $\langle f(M,t) \rangle = \frac{1}{V} \int_V f(M,t) dV$

- Les longueurs caractéristiques thermique et visqueuse : elles représentent la relation entre les dimensions moyennes des cellules et respectivement les pertes thermiques et visqueuses.

La longueur caractéristique visqueuse est donnée par la formule suivante :

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\int_{S_p} \vec{V}^2 dS_p}{\int_{V_p} \vec{V}^2 dV_p} \quad \text{III.4}$$

La longueur caractéristique thermique est donnée par la formule suivante :

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{S_p}{V_p} \quad \text{III.5}$$

avec S_p et V_p la surface mouillée et le volume ouvert des pores par unité de volume du matériau. \int_{S_p} est l'intégrale sur la surface mouillée S_p des pores contenue dans un volume unité, et \int_{V_p} l'intégrale sur le volume V_p fluide contenu dans un volume unité du matériau.

4) Concepts et modèles

Le phénomène de propagation du son est très complexe dans un matériau poreux à cause de la micro-géométrie de la structure du squelette. Seules les valeurs moyennes au niveau macroscopique nous intéressent, à condition que ces moyennes soient bien évaluées.

Au niveau macroscopique, lorsque le squelette est suffisamment rigide ou souple, le milieu poreux est considéré comme un fluide équivalent avec une densité complexe $\tilde{\rho}$ et un module de compressibilité complexe \tilde{K} qui dépendent de la fréquence angulaire ω afin de respecter les équations macroscopiques locales (équation d'Euler et la loi de comportement du fluide) [Allard et Atalla, 2009].

Il existe plusieurs modèles qui donnent des expressions de la densité complexe et du module de compressibilité complexe en fonction des propriétés physiques de l'air et de la microstructure du matériau poreux. Parmi ces modèles on peut citer le modèle de *Delany et Bazley* [Delany et Bazley, 1970] qui ont réalisé de nombreuses mesures du nombre d'onde $k=\omega/c$ et de l'impédance caractéristique Z_c sur une large gamme de fréquence pour des laines de verre à forte porosité. À partir de ces mesures, il s'avère que le nombre d'ondes et l'impédance dépendent essentiellement de la fréquence et de la résistance statique au passage de l'air σ .

Les équations de Delany et Bazley sont souvent utilisées, mais elles ne permettent pas une très bonne prédiction du comportement acoustique de tous les types de matériaux poreux.

La complexité de la géométrie des matériaux poreux rend le calcul direct des interactions visqueuses thermiques très difficiles. Zwikker et Kosten [Zwikker et Kosten, 1949] ont établi un modèle simplifié de la propagation du son dans des tubes cylindriques dans lesquels ils ont découplé les effets visqueux et thermiques pour être traités séparément. Pour représenter ces deux types de dissipation, ils leur ont associé respectivement la masse

volumique complexe et la compressibilité complexe. Dans notre cas, on n'utilise pas ce genre d'approche dite phénoménologique vue qu'elle ne reflète pas la complexité structurale de notre mousse.

Dans les travaux de Johnson *et al.* [Johnson *et al.*, 1987], les auteurs étudient la réponse visqueuse d'un fluide Newtonien saturant un poreux isotrope rigide soumis à un gradient de pression à ses bornes. Ils proposent un modelé simple basé sur une fonction d'interpolation et introduisent un paramètre macroscopique gouvernant le comportement asymptotique hautes fréquences : c'est la longueur caractéristique visqueuse Λ . Ce modèle présente une solution pour relier les domaines hautes et basses fréquence de la densité complexe (ou plutôt de la tortuosité dynamique) et représente assez fidèlement les effets visqueux. Cette solution est exacte dans sa limite haute fréquence, mais non exacte dans sa limite basse fréquence. Pride *et al.* [Pride *et al.*, 1992] proposent des fonctions plus exactes en introduisant un nouveau paramètre macroscopique défini par la tortuosité visqueuse basse fréquence (tortuosité statique), pour corriger les faiblesses du modèle de Johnson *et al.*

Champoux et Allard [Champoux et Allard, 1991] ont suivi le même raisonnement que Johnson *et al.* pour décrire la dépendance en fréquence du module de compressibilité complexe. Cette description introduit la longueur caractéristique thermique et tient compte des pertes par échanges thermiques entre le fluide et le squelette.

En regroupant les travaux de Johnson *et al.* et de Champoux et Allard, un matériau poreux à squelette rigide peut être modélisé comme un fluide équivalent ayant la masse volumique complexe et le module de compression complexe donnés ci-dessous :

$$\tilde{\rho}(\omega) = \rho_0 \alpha_\infty \left(1 + \frac{\alpha \phi}{j \omega \rho_0 \alpha_\infty} \sqrt{1 + j \omega \eta \rho_0 \left(\frac{2 \alpha_\infty}{\phi \sigma \Lambda} \right)^2} \right) \quad \text{III.6}$$

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8 \eta}{j \omega \rho_0 P_r \Lambda^2} \sqrt{1 + j \frac{\omega \rho_0 P_r \Lambda^2}{16 \eta}} \right]^{-1}} \quad \text{III.7}$$

où P_0 est la pression statique, γ est le rapport des chaleurs spécifiques, ω est la fréquence angulaire, Pr est le nombre de Prandtl, ρ_0 est la masse volumique de l'air et η est la viscosité

dynamique de l'air. Ces deux équations forment le modèle que nous appellerons Johnson-Champoux-Allard (JCA).

Similairement à Pride *et al.*, Lafarge *et al.* raffinent le modèle de Champoux et Allard en considérant la réponse en basse fréquence et en introduisant la perméabilité thermique statique (ce qui modifie l'expression du module de compressibilité III.7) [Lafarge, 1993].

Pour l'étude présente, le modèle JCA est retenu puisqu'il nous permet d'avoir une bonne précision avec moins de complexité que les modèles combinés de Pride *et al.* et de Lafarge *et al.*.

IV. CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE

1) Description des échantillons

L'IMI/CNRC nous a fourni 9 échantillons en mousse de Nickel et 9 en Inox. Les mousses de Nickel et d'Inox reçues sont formées chacune de trois grades : à pores microscopiques, à pores intermédiaires et à pores macroscopiques. Nous avons donc 3 échantillons pour chaque grade.

Les mousses sont fabriquées par le procédé métallurgique développé à l'IMI, elles sont ensuite usinées pour avoir une forme cylindrique de diamètre 29 mm et de hauteur 12,5 mm environ, comme le montre la Figure IV-1. En ce qui concerne les mousses de Nickel l'usinage est conventionnel. Par contre pour les mousses d'Inox, caractérisées par leur dureté, un tel usinage risque d'endommager les pores qui se trouvent à la surface. Dans ce cas l'usinage est réalisé par EDM (Electric Discharge Machining).

Nos échantillons possèdent une porosité ouverte qui leur confère de bonnes caractéristiques au niveau de l'absorption sonore. En regardant ces derniers au microscope électronique à balayage, on constate sur les Figures IV.2.a qu'ils sont formés d'une succession de pores qui sont connectés les uns aux autres à travers des ouvertures sur leurs parois. Ces ouvertures sont appelées des fenêtres, Figure IV.2.b.

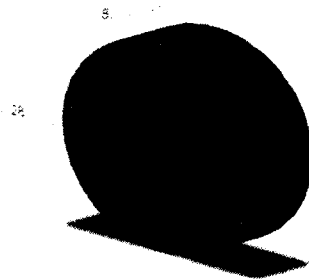


Figure IV-1: Représentation 3D des éprouvettes

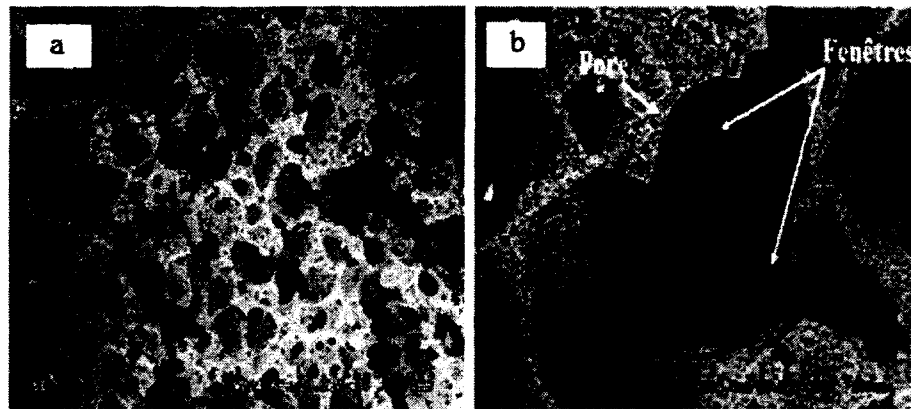


Figure IV-2: Microstructure de la mousse de Nickel fabriquée par l'IMI

2) Description des mesures expérimentales réalisées

a- Mesure de la porosité

Le laboratoire de caractérisation des matériaux acoustiques LCMA de l'Université de Sherbrooke est doté d'un porosimètre qui permet d'avoir une mesure directe de la porosité. Cette mesure se base sur le calcul du volume total et du volume vide [Salissou et Panneton, 2006].

Pour avoir le volume vide de l'échantillon, il faut mesurer le volume total de l'enceinte, dans laquelle on placera notre échantillon ultérieurement, à partir de la pression qui y règne et de la masse obtenue par deux mesures successives, la première avec une saturation de gaz et la deuxième à vide. Ensuite, on refait le même travail avec l'échantillon dans l'enceinte. En calculant la différence entre les deux mesures, avec et sans échantillon, on arrive à mesurer le volume de fluide occupé au sein de l'échantillon en utilisant la loi des gaz parfaits. L'utilisation du porosimètre nécessite des échantillons assez volumineux, ce qui n'est pas le cas avec nos mousses.

Une autre approche pour mesurer la porosité des échantillons se base sur le fait que nous connaissons la densité du matériau composant le squelette de la mousse. Comme vu au chapitre précédent, la porosité est :

$$\phi = \frac{V_p}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} \quad \text{IV.1}$$

avec: V_s : volume du squelette.

V_p : volume du fluide (air) dans l'échantillon.

V_t : volume total de l'éprouvette.

Si nous supposons que la masse de l'échantillon sous vide est égale à celle mesurée dans l'air (i.e., on néglige l'influence de la partie fluide du matériau), la porosité d'un échantillon cylindrique est donnée par :

$$\phi = 1 - \frac{M_e}{\rho_{sq} \pi r^2 h} \quad \text{IV.2}$$

où

M_e : masse de l'échantillon mesurée sur une balance

ρ_{sq} : masse volumique du matériau constituant le squelette

r : rayon de l'échantillon

h : épaisseur de l'échantillon

b- Mesure de la résistivité

Des mesures de résistivité au passage de l'air sont effectuées sur nos échantillons avec le résistivimètre du LCMA. Pour cela l'échantillon est soumis à un flux d'air continu. La résistivité est déduite à partir de la mesure du débit volumique et de la chute de pression entre les deux faces libres de l'échantillon selon la formule donnée au chapitre précédent.

c- Mesures acoustiques

Les mesures acoustiques sont réalisées à l'aide d'un tube d'impédance acoustique suivant la norme ASTM E1050.

Le principe est basé sur la mesure de la fonction de transfert H entre 2 signaux fournis par 2 microphones montés sur la paroi du tube. Un haut-parleur, placé à l'extrémité du tube, est excité par un bruit blanc via le générateur de l'analyseur et l'amplificateur de puissance. On crée ainsi un système d'ondes planes stationnaires dans le tube. La pression mesurée sur chaque microphone peut être décomposée en pression incidente et réfléchie. Le coefficient de réflexion R du matériau est alors déterminé par :

$$R = \left(\frac{H - e^{-jks}}{e^{jks} - H} \right) e^{2k(l+s)} \quad \text{IV.3}$$

avec :

k : nombre d'onde dans l'air

s : espacement entre les microphones

l : distance entre la surface du matériau et le microphone le plus proche de l'échantillon

La détermination du coefficient de réflexion permet ensuite d'accéder au coefficient d'absorption et à l'impédance de surface du matériau:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad \frac{Z}{\rho_0 c} = \frac{1 + R}{1 - R} \quad \text{IV.4}$$

où c est la célérité du son dans l'air.

Le tableau suivant donne les caractéristiques du tube de Kundt utilisé :

Tableau IV.1: Caractéristiques du tube de Kundt

Diamètre intérieur du tube (m)	0,029
Distance microphone-échantillon (m)	0,0135
Distance inter microphone (m)	0,04

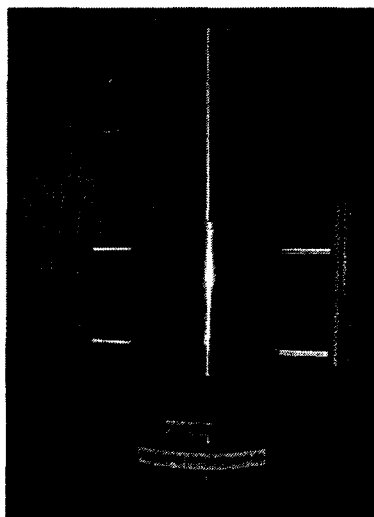


Figure IV-3: Tube de Kundt

3) Propriétés acoustiques des mousses de Nickel

Comme mentionné ci-haut, l'IMI nous a fourni 9 échantillons en mousse de Nickel. Les échantillons sont de trois grades : à pores microscopiques, intermédiaires et macroscopiques. Dans ce qui suit, on appellera P les échantillons à petits pores, M ceux à moyens pores et G ceux à gros pores. Dans les trois cas l'épaisseur des échantillons est de 12 mm environ.

a- Caractérisation des mousses de Nickel avec un fond rigide

Effet du niveau de pression acoustique (Sound Pressure Level : SPL)

Afin de vérifier la linéarité des mousses de Nickel en fonction du niveau de pression sonore, on a effectué des mesures acoustiques pour différents niveaux de pression sonore (*SPL*). Le *SPL* varie entre 110 et 160dB avec un pas de 10dB. Les courbes d'absorption, de résistance et de réactance, présentées dans ce qui suit sont les moyennes mesurées des trois échantillons de chaque grade P, M et G.

Dans ce qui suit on se contentera de la présentation, sur la Figure IV.4, des résultats obtenus pour les échantillons à petits pores. Les résultats correspondants aux échantillons à moyen et à gros pores possèdent les mêmes tendances. Pour tous les grades, on remarque que l'absorption est large bande avec un comportement linéaire jusqu'à 130dB. Pour les niveaux d'excitations plus élevées, on voit un léger comportement non linéaire en fonction du SPL.

En conséquence, nous considérerons que les mousses de Nickel possèdent un comportement acoustique linéaire jusqu'à au moins 160 dB.

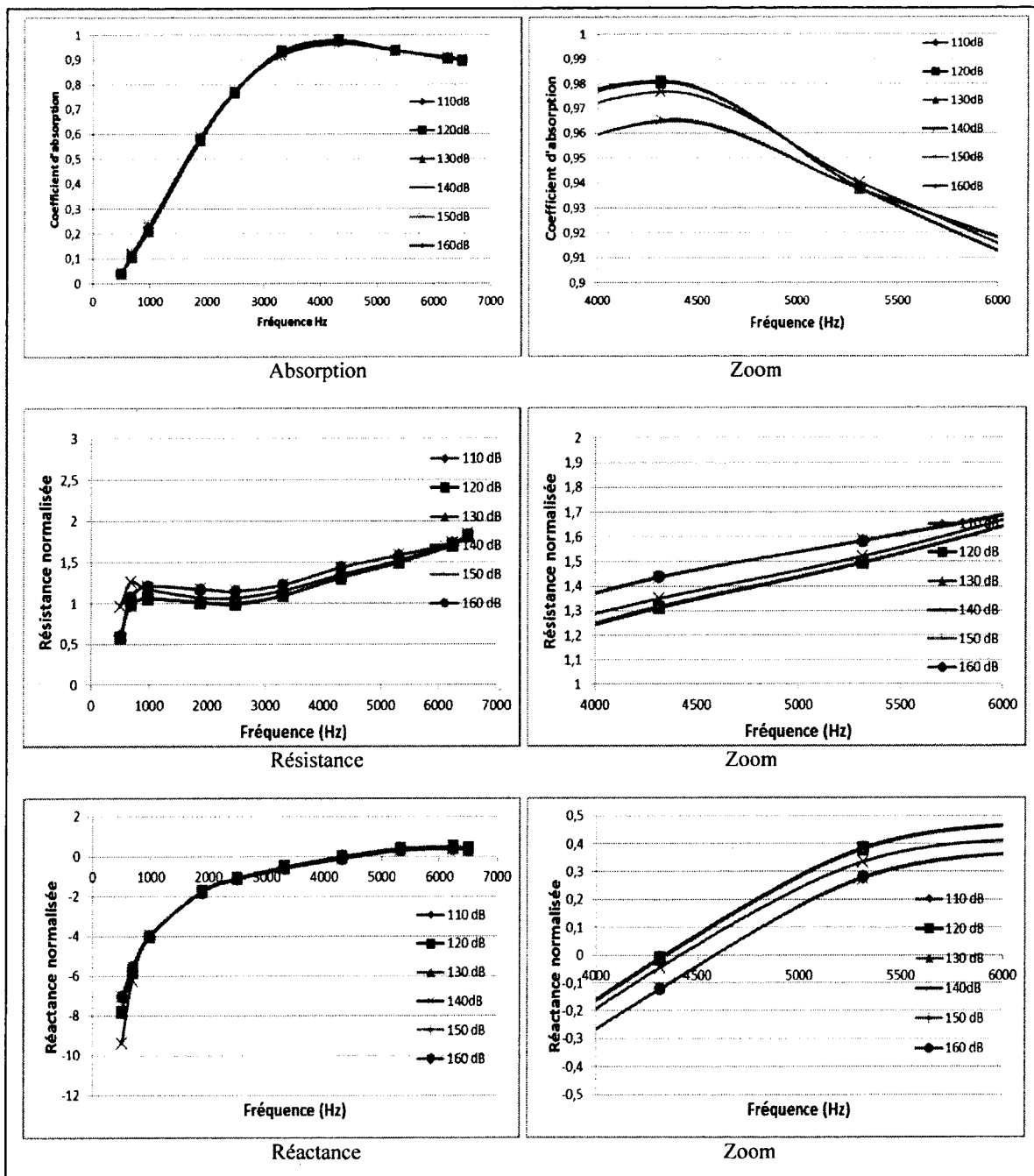


Figure IV-4: Mesures acoustiques de l'échantillon de Nickel à petits pores (P)

Effet du grade à 130dB

Pour évaluer l'effet du grade sur la réponse acoustique, on compare les courbes mesurées des différents grades à chaque niveau SPL. On se contentera de présenter que les

résultats à une excitation de 130dB puisque que nous avons conclu à la linéarité des mousses de Nickel. La Figures IV.5 présente respectivement l'effet du grade sur l'absorption, la résistance et la réactance.

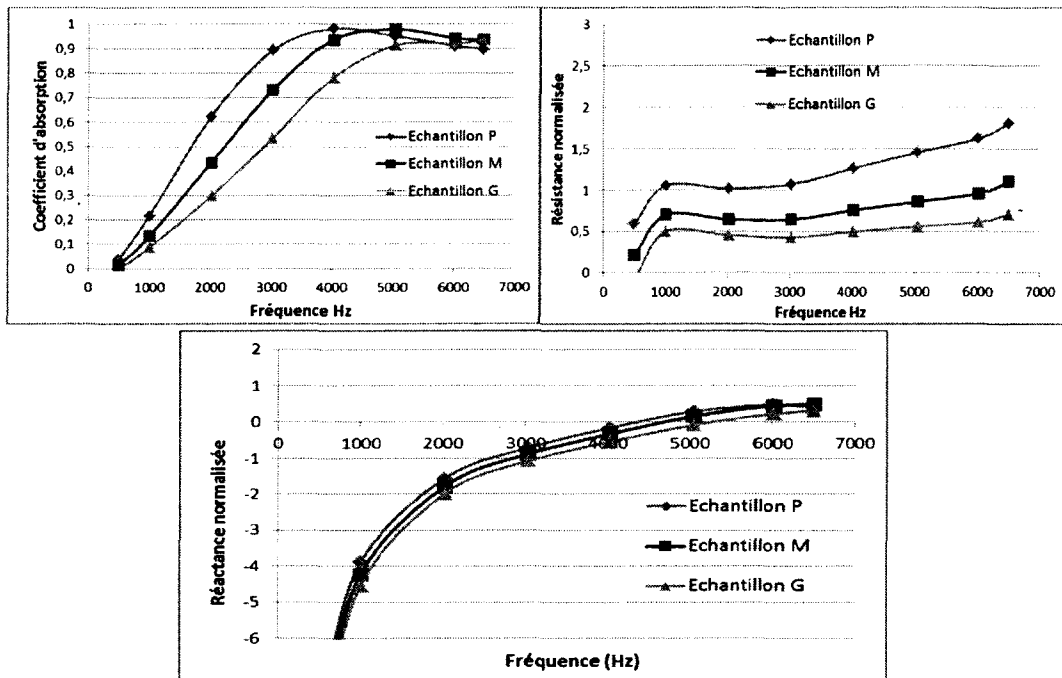


Figure IV-5: Effet du grade sur la réponse acoustique des mousses de Nickel avec un fond rigide et à 130dB

On observe que le grade P offre une résistance beaucoup plus grande que les autres grades et que sa réactance passe par zéro environ 1000 Hz plus tôt par rapport au grade M. Ce qui lui confère une efficacité acoustique plus rapidement en fréquence par rapport aux autres grades.

En conséquence, les mousses de Nickel à petits pores (grade P) présentent une absorption acoustique plus intéressante que les autres grades (M et G).

b- Caractérisation acoustique de la mousse avec une cavité de 10 mm

Les systèmes résonants peuvent constituer de bons dispositifs absorbants car ils ont la particularité d'être sélectifs. Les systèmes les plus utilisés sont les résonateurs de cavité. La cavité et le pore jouent respectivement les rôles d'un ressort et d'une masse comme le montre la Figure IV.6.

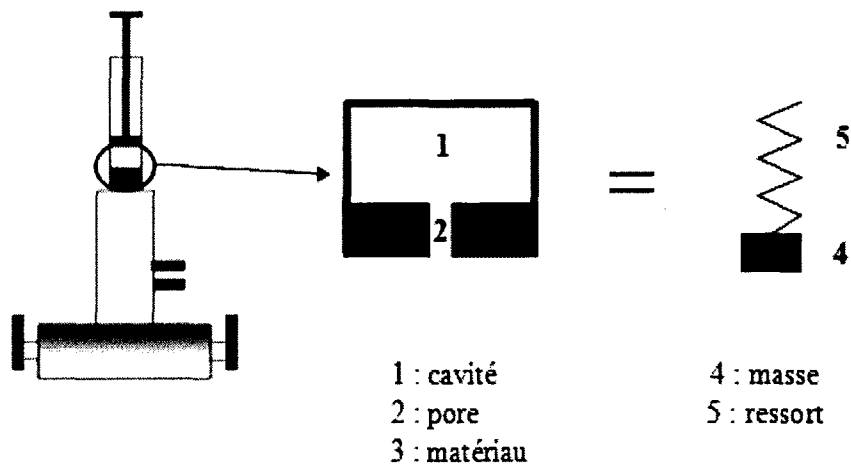


Figure IV-6: Résonateur de cavité

Effets du SPL

Dans cette partie on verra l'effet de la cavité sur la linéarité de la réponse acoustique de la mousse de Nickel. On se limite à la présentation des résultats obtenus sur les échantillons à petits pores. Pour les échantillons à moyen et gros pores l'allure des courbes est semblable. Comme on peut voir sur les graphiques de la Figure VI.7, on observe une absorption large bande avec un léger comportement non-linéaire en fonction du SPL comme dans le cas fond rigide.

En conséquence, la présence de cavité en arrière de l'échantillon de mousse de Nickel n'affecte pas la linéarité du comportement acoustique jusqu'à au moins 160 dB.

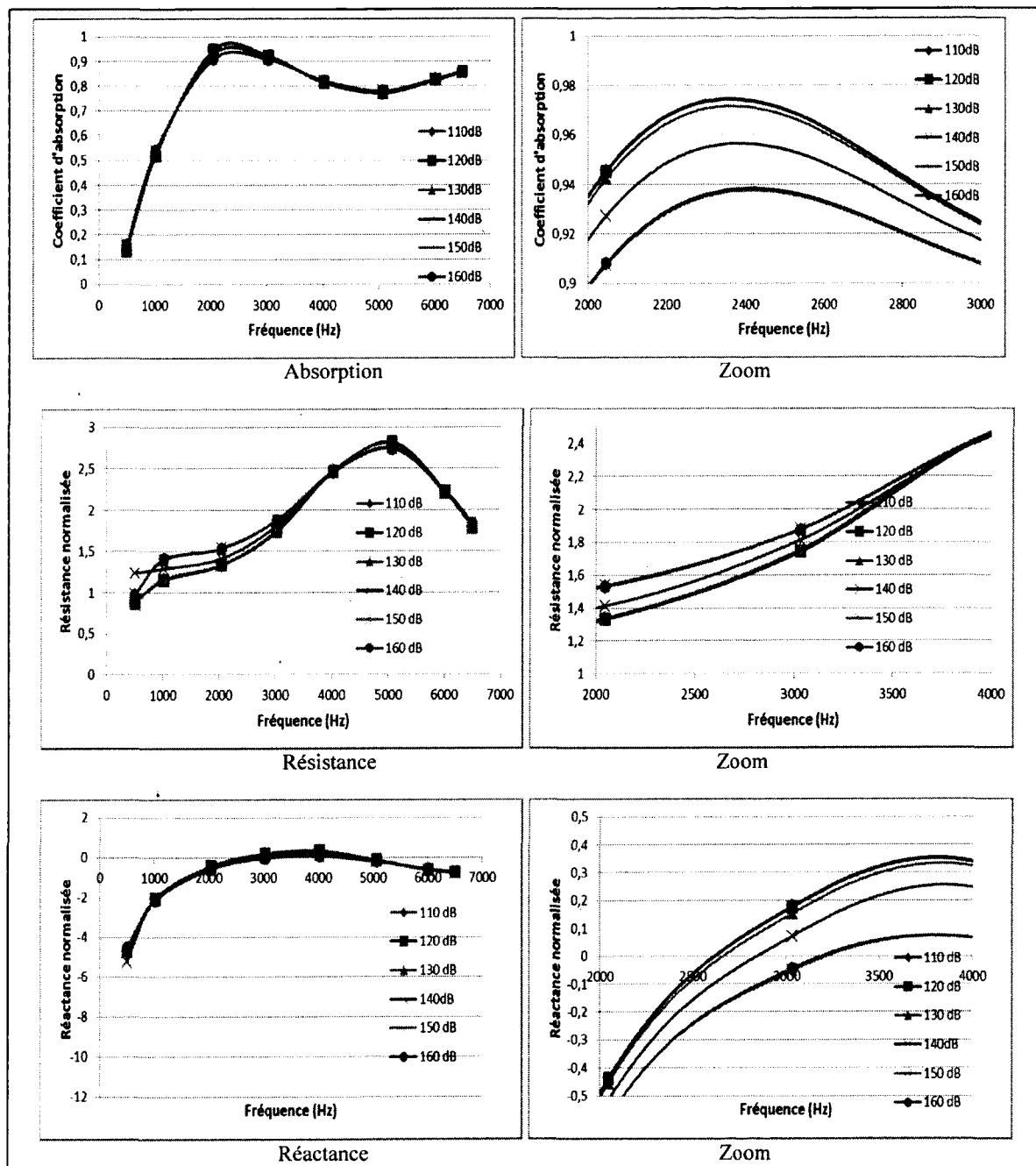


Figure IV-7: Mesures acoustiques de l'échantillon de Nickel à petits pores avec cavité

Effet du grade

Comme pour le cas fond rigide, pour évaluer l'effet du grade sur la réponse acoustique, on a comparé les courbes mesurées des différents grades à chaque niveau SPL. La Figure IV.8 présente respectivement l'effet du grade sur l'absorption, la résistance et la réactance à une excitation de 130dB.

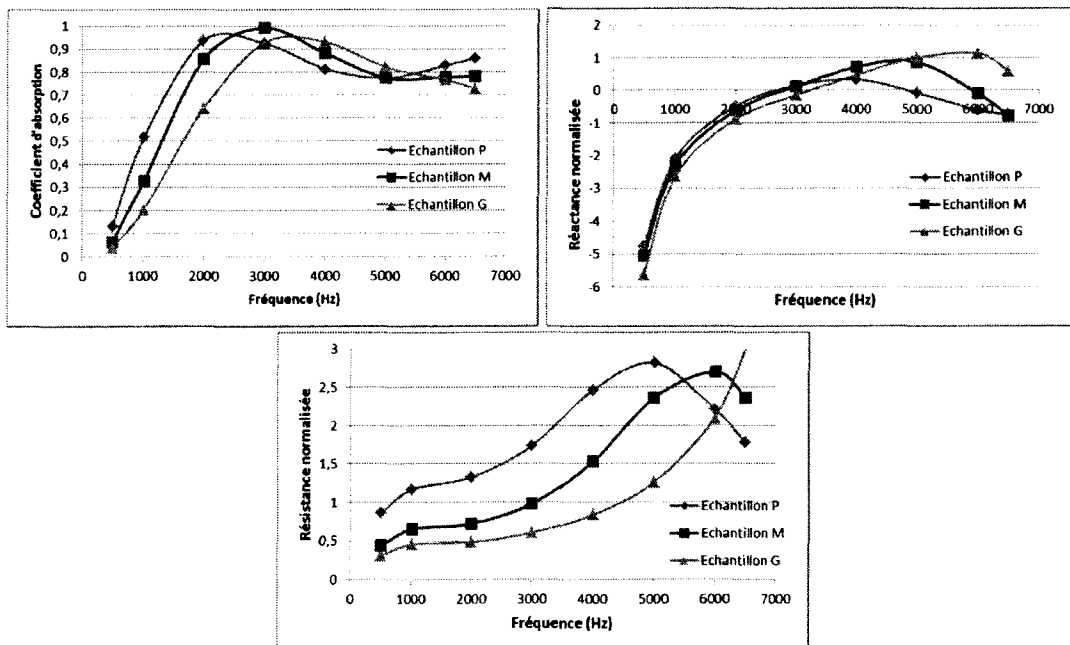


Figure IV-8: Effet du grade sur la réponse acoustiques des mousses de Nickel avec cavité et à 130dB

On remarque que les grades P et M, à petits et moyens pores, offrent des performances acoustiques comparables et plus élevées que celle des échantillons à gros pores.

c- Étude de la symétrie de la réponse des mousses de Nickel

À partir de la comparaison des mesures expérimentales des deux faces de chaque échantillon, illustrées sur la Figure IV.9, on remarque que la réponse acoustique de la mousse de Nickel est symétrique.

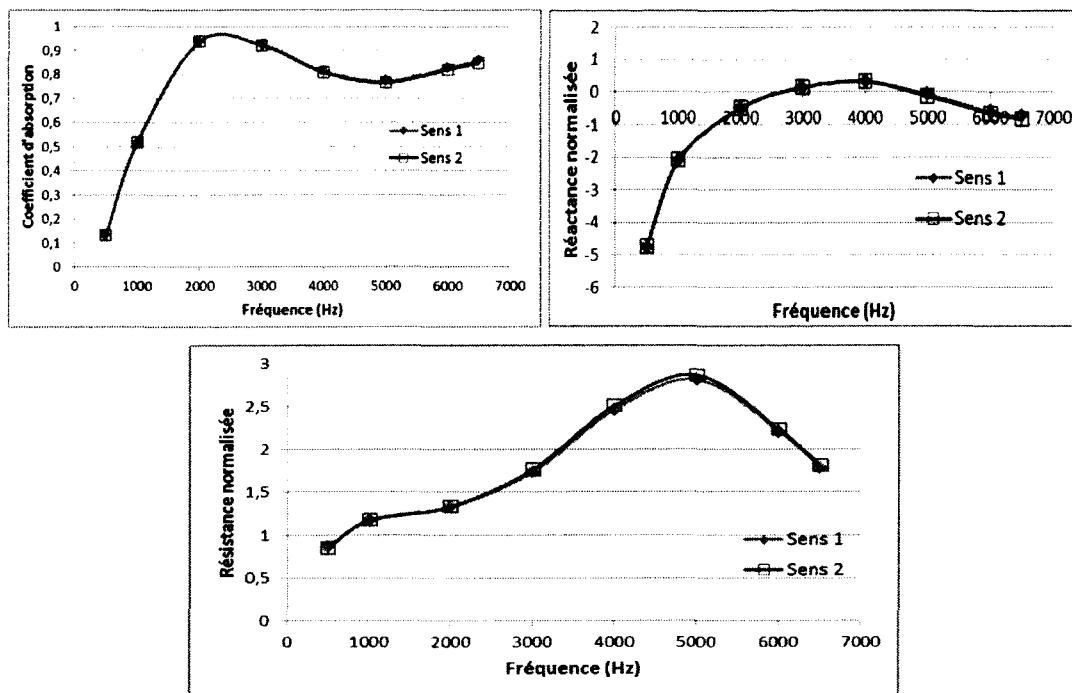


Figure IV-9: Symétrie de la réponse acoustique du Nickel

d- Effet de la cavité

On a comparé les courbes d'absorption, de résistance et de réactance pour le cas à fond rigide et dans le cas d'une cavité de 10 mm en arrière de l'échantillon et ceci pour différents SPL. Puisque l'allure des courbes se ressemble pour les différents SPL et grades, on se contentera de présenter à la Figure IV.10 les résultats correspondants aux échantillons à petits pores et soumis à une excitation de 140dB.

Au niveau des courbes d'absorption, on remarque que la cavité permet de translater les courbes vers les plus basses fréquences. Ce qui est logique puisqu'il y'a un effet d'amortissement du champ acoustique. Au niveau de la réactance, les courbes passent par zéro à la même fréquence dans les deux cas. Ici, l'effet de la cavité sur la mousse est similaire à l'effet de la cavité sur une plaque perforée. Cependant, l'absorption est large bande avec la mousse.

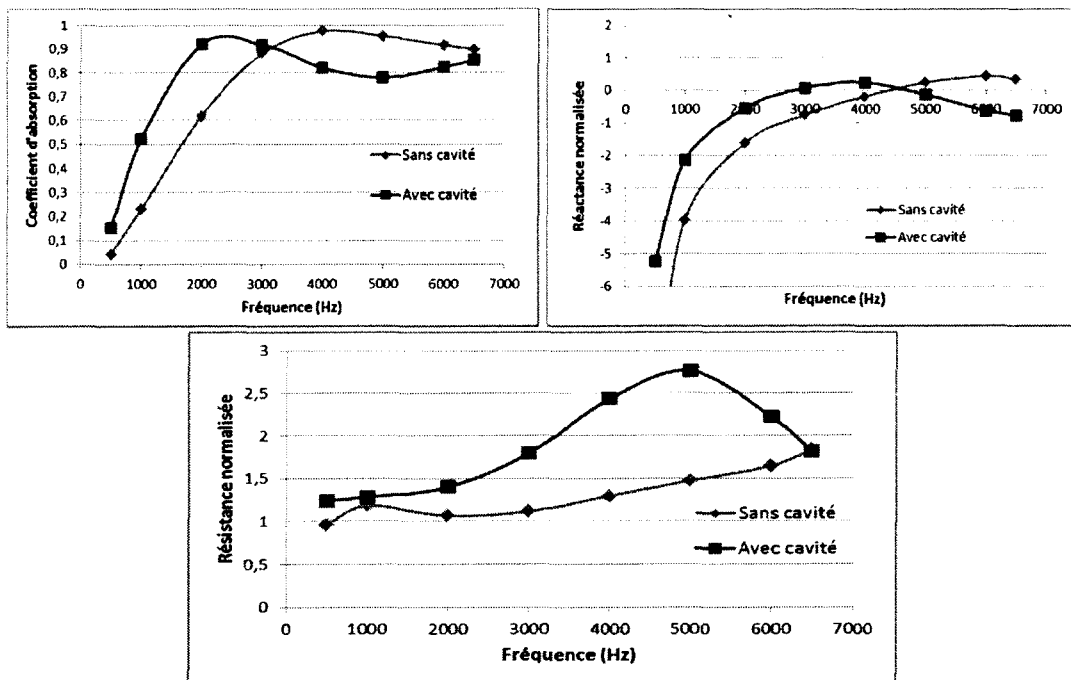


Figure IV-10: Effet de la cavité sur la réponse acoustique des mousses de Nickel à 140dB

4) Propriétés acoustiques des mousses d'Inox

Comme pour les mousses de Nickel, l'IMI nous a fournis 9 échantillons en mousse d'Inox d'épaisseur 12 mm. Les échantillons sont de trois grades : à pores microscopiques, intermédiaires et macroscopiques. Dans ce qui suit on appellera P les échantillons à petits pores, M ceux à moyens pores et G ceux à gros pores.

a- Caractérisation des mousses d'Inox avec un fond rigide

Effets du SPL

Afin de vérifier la linéarité des mousses de Nickel en fonction du niveau de pression sonore, on a effectué des mesures acoustiques pour différents niveaux de pression sonore (SPL), allant de 110 à 160dB avec un pas de 10dB. Les courbes d'absorption, de résistance et de réactance, présentées dans ce qui suit sont les moyennes mesurées des trois échantillons de chaque grade P, M et G.

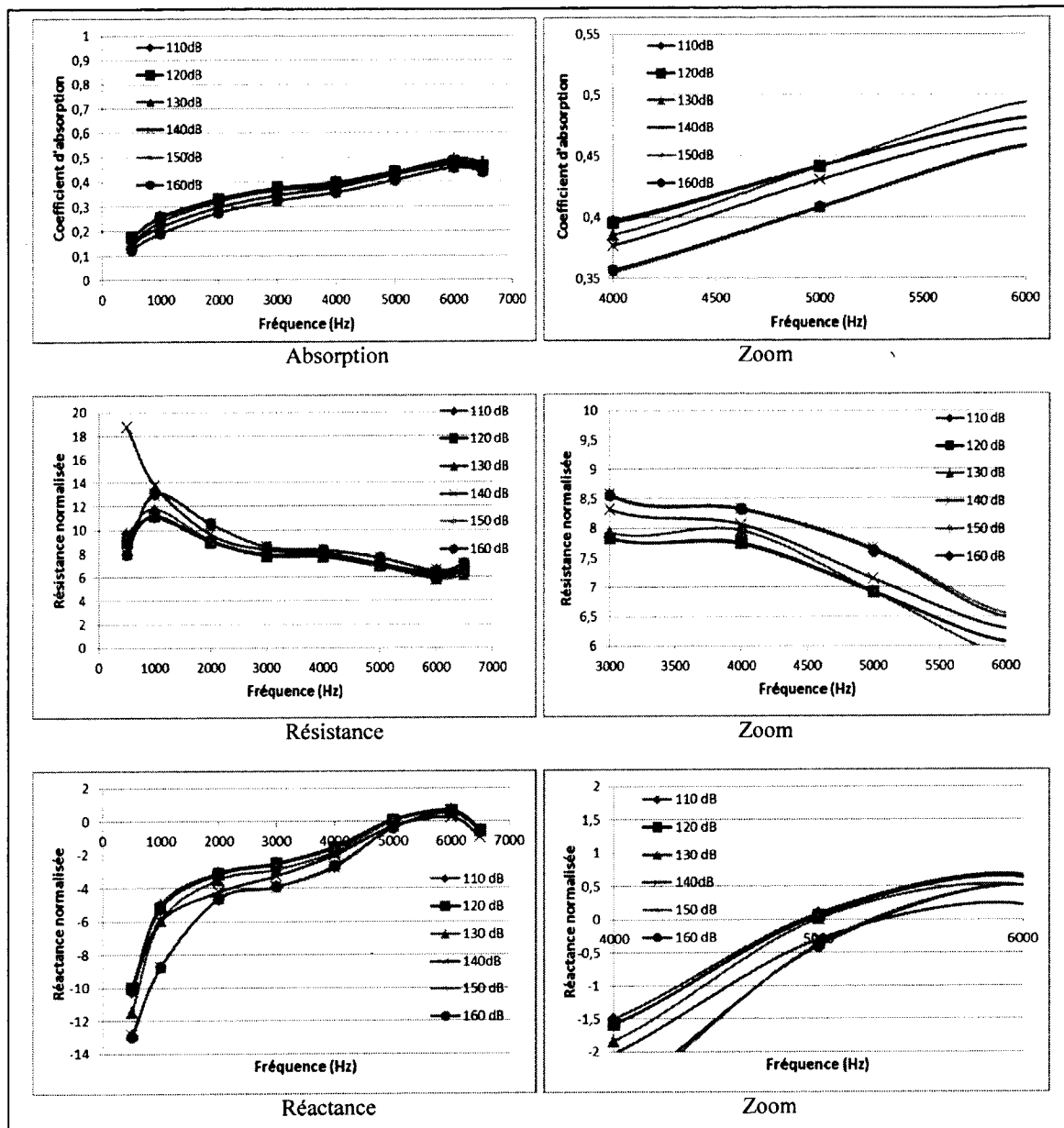


Figure IV-11: Mesures acoustiques de l'échantillon d'Inox à gros pores (G)

Dans ce qui suit on se contentera de la présentation des résultats obtenus pour les échantillons à gros pores. Les résultats correspondants aux échantillons à petits et à moyens pores possèdent les mêmes tendances.

Comme pour les mousses de Nickel, on remarque que l'absorption est large bande avec un comportement assez linéaire jusqu'à 130dB pour tous les grades. Par contre, l'absorption reste faible. Pour les niveaux d'excitations plus élevées, on voit un certain comportement non

linéaire en fonction du *SPL*. Comparativement aux mousses de Nickel, la mousse d'Inox ne constitue pas un bon absorbeur sonore.

En conséquence, nous considérerons que les mousses d'Inox possèdent un comportement acoustique linéaire jusqu'à 130 dB. Pour des niveaux d'excitation sonore plus élevés une certaine non-linéarité apparaît.

Effet du grade

Pour évaluer l'effet du grade sur la réponse acoustique, on a comparé les courbes mesurées des différents grades, à chaque niveau *SPL*. On présentera respectivement dans la Figure IV.12 l'effet du grade sur l'absorption, la réactance et la résistance pour une excitation de 130dB.

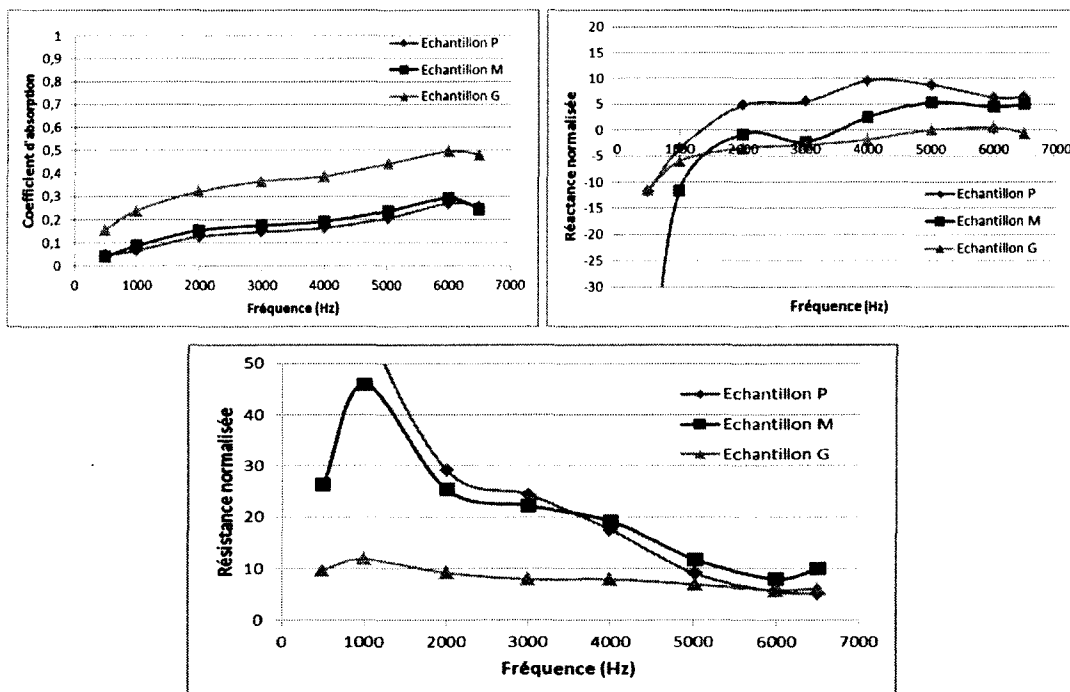


Figure IV-12: Effet du grade sur la réponse acoustique des mousses d'Inox avec un fond rigide et à 130dB

À partir de la figure IV-12, on observe que la résistance augmente lorsque les pores sont plus petits, cette résistance est d'autant plus grande que les ondes acoustiques ne pénètrent pas le matériau d'où la diminution de l'absorption. Donc pour ces mousses d'Inox il faut chercher un

procédé qui permet l'obtention de pores plus grand permettant ainsi à l'onde acoustique de traverser le matériau sur toute son épaisseur. En effet pour qu'un matériau soit un bon absorbeur il faut trouver un bon compromis au niveau de sa résistance. Une valeur très faible de la résistance entraine un passage très rapide de l'onde acoustique sans subir de perte visqueuse, ce qui va affecter le niveau d'absorption. Au même titre qu'une valeur de résistance très élevée empêche l'onde de pénétrer le matériau.

En conséquence, les mousses d'Inox présentent une faible absorption acoustique. Leur résistance élevée empêche l'onde sonore de pénétrer le matériau.

b- Caractérisation acoustique de la mousse d'Inox avec une cavité de 10 mm

Comme pour les mousses de Nickel, on a placé une cavité de 10 mm derrière les échantillons d'Inox, au niveau de l'effet du SPL et du grade, les courbes ne changent pas trop par rapport à la mesure sans cavité à cause de la résistivité très élevée. Pour cette raison on ne les présentera pas.

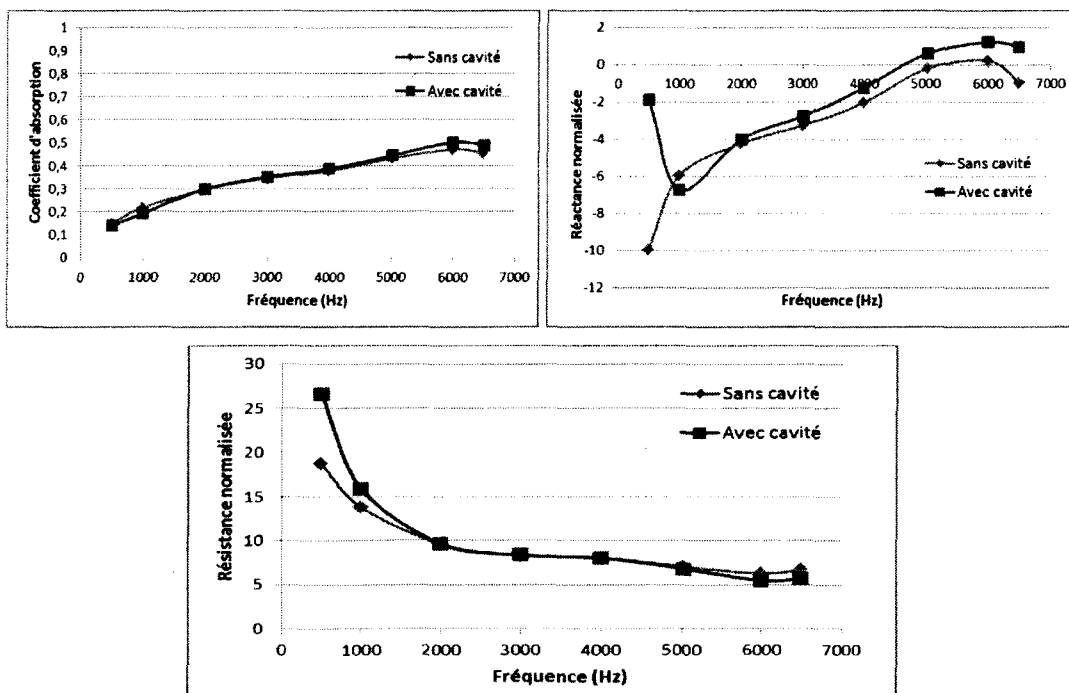


Figure IV-13: Effet de la cavité sur la réponse acoustique des mousses d'Inox à 140dB

Pour bien visualiser l'effet négligeable de la cavité, on a comparé sur la Figure IV.13, les courbes d'absorption, résistance et réactance mesurées avec et sans cavité pour les échantillons d'Inox à gros pores soumis à une excitation de 140dB. Pour les autres grades et niveau d'excitation l'allure des courbes reste la même.

À partir de la Figure IV.13, on peut constater que pour les mousses d'Inox l'effet de la cavité n'est pas très important vue la grande résistance du matériau qui empêche l'onde de passer à travers toute son épaisseur et d'atteindre ainsi la cavité située derrière la mousse.

c- Étude de la symétrie de la réponse de l'échantillon en mousse d'Inox

À partir de la comparaison de la Figure IV.14, des mesures expérimentales des deux faces de chaque échantillon, on remarque que la réponse acoustique de la mousse d'Inox présente une certaine asymétrie mais qui reste négligeable.

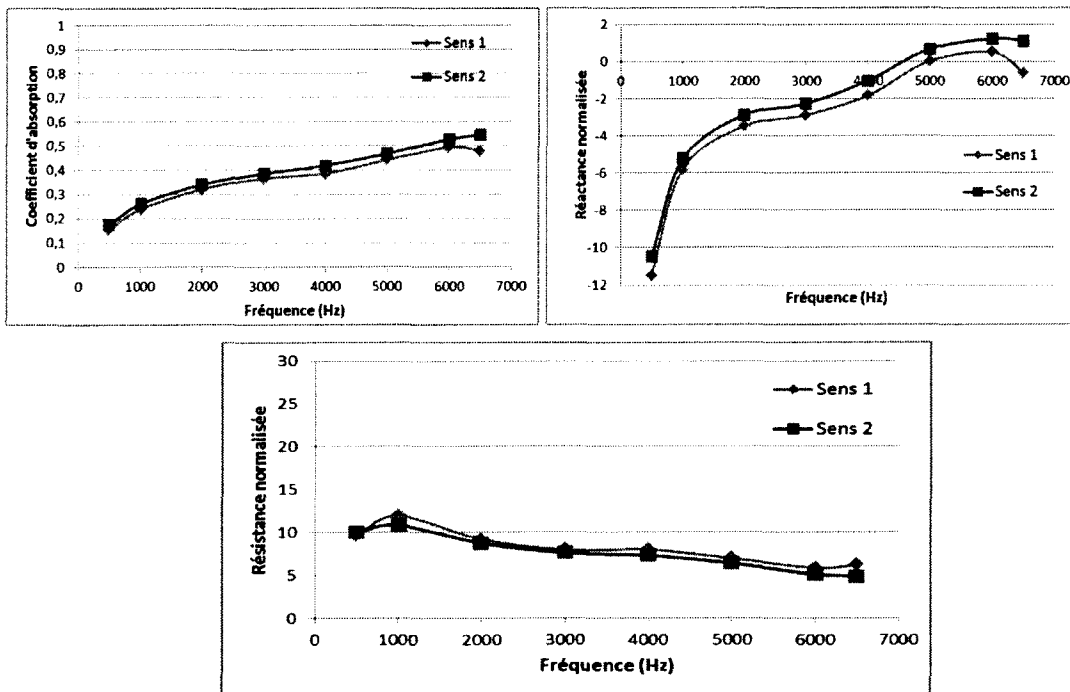


Figure IV-14: Symétrie de la réponse acoustique de l'Inox à 140dB

5) Comparaison entre les mousses d'Inox et de Nickel

À partir de l'observation visuelle des échantillons de Nickel et d'Inox de même épaisseur, il apparaît clairement que les deux matériaux sont assez différents. Dès lors, il reste

à comparer leurs performances acoustiques. La comparaison est réalisée avec une excitation de 130dB dans le cas où il n'y a pas de cavité derrière l'échantillon, l'épaisseur des échantillons est d'environ 12 mm. La Figure IV.15 présente respectivement l'effet du matériau sur l'absorption, la réactance et la résistance. On va considérer les échantillons de Nickel « P » à petit pores et ceux en Inox « G » à gros pores.

On remarque que la mousse de Nickel absorbe mieux les ondes sonores. La mousse d'Inox est très résistive ce qui affecte son pouvoir absorbant, ajoutant à ça le fait que celle-ci est plus lourde que les éprouvettes de même volume en Nickel, cela nous laisse penser que les mousses de Nickel sont les plus performantes pour une épaisseur de 12 mm.

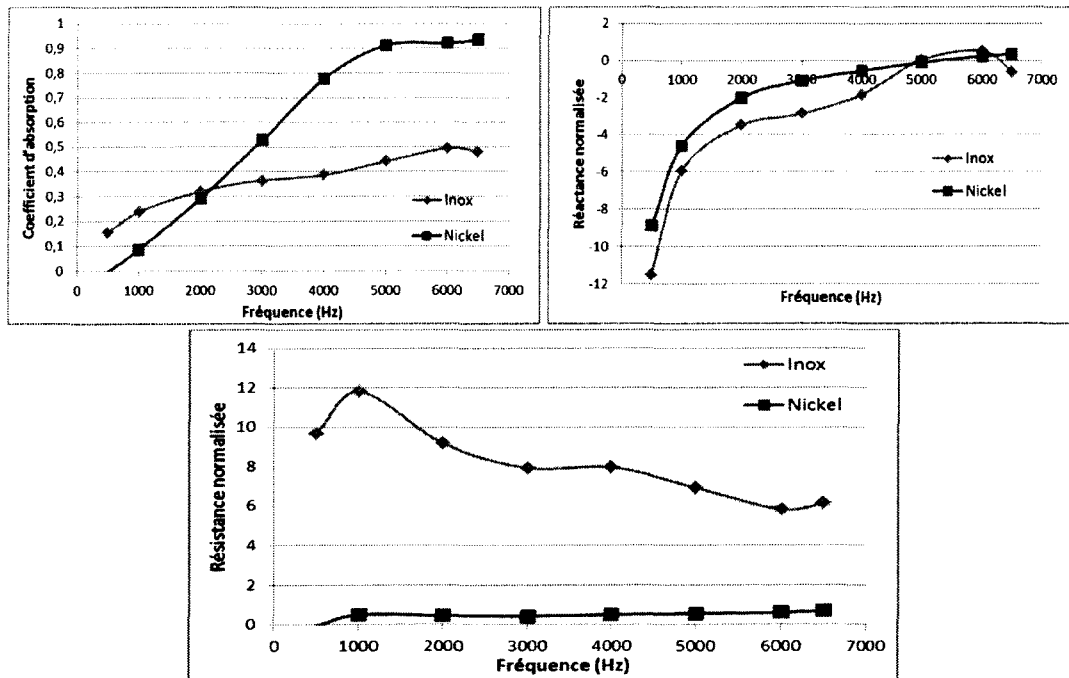


Figure IV-15: Effet du matériau sur la résistance

6) Conclusion

Les mousses de Nickel possèdent un comportement acoustique linéaire jusqu'à 160dB. La présence de cavité en arrière de l'échantillon n'affecte en rien la linéarité de la réponse acoustique. Dans notre cas, la mousse de Nickel à petits pores présente une absorption acoustique plus intéressante que les autres grades (M et G).

Les mousses d'Inox possèdent un comportement acoustique linéaire jusqu'à 130 dB. Pour des niveaux d'excitation sonore plus élevé une certaine non-linéarité apparaît. Dans notre cas les échantillons en mousses d'Inox possèdent une faible absorption acoustique. Leur résistance élevée empêche l'onde sonore de pénétrer le matériau.

En comparant les performances acoustiques des deux matériaux étudiés, il apparaît que les mousses de Nickel sont plus absorbantes que les mousses d'Inox, qui possèdent une résistance très élevée.

Pour les mousses d'Inox, leur microstructure fait que leur résistance est très élevée ce qui peut être considéré comme un handicap au niveau de leurs performances acoustiques. Donc pour ces dernières il est plus avantageux d'avoir des éprouvettes avec de gros pores pour faciliter le passage de l'onde à travers l'échantillon.

Les deux types de mousses étudiées absorbent sur une large bande de fréquences. Leur comportement peut être considéré comme linéaire au moins jusqu'à 160 dB. Ceci semble prometteur pour éviter les problèmes liés à l'absorption sélective des *liners* en forme de nid d'abeille.

Dans ce qui suit on s'intéressera aux mousses de Nickel à petits pores et à celles en Inox avec de gros pores.

V. CARACTÉRISATION PHYSIQUE

Comme déjà définies au Chapitre II, les propriétés physiques (porosité, résistivité, tortuosité, longueur caractéristique thermique et visqueuse) des mousses donnent une idée sur leur microstructure qui est, à son tour, intimement liée à leurs performances acoustiques.

Ces propriétés physiques sont en général difficiles à mesurer. Des techniques assez récentes basées sur des calculs inverses trouvent leur essor vu que ces dernières n'exigent ni un volume important de matériau, ni un matériel spécialisé.

Le logiciel *Foam-X* développé par le Groupe Acoustique de l'Université de Sherbrooke permet une inversion à 5 paramètres à partir du modèle de *Johnson Champoux Allard* [Atalla et Panneton, 2005]. Ce logiciel se base sur les mesures en tube d'impédance suivant la norme ASTM E1050 ou ISO 10534-2. La Figure V.1 présente le principe de fonctionnement simplifié de *Foam-X*.

Foam-X est un logiciel utilisé pour définir les propriétés acoustiques des matériaux poreux avec des cellules ouvertes. *Foam-X* utilise deux méthodes : la méthode de caractérisation inverse et la méthode de caractérisation indirecte. Dans notre étude on utilise la première méthode. Dans ce cas, on définit un vecteur $\vec{a} = [\emptyset, \sigma, \alpha_\infty, \Lambda, \Lambda']$ caractérisant le matériau poreux. En se basant sur des algorithmes mathématiques, *Foam-X* permet de rapprocher les courbe acoustiques mesurées par le tube de Kundt avec celles des modèles qui décrivent le comportement du matériau poreux en variant le vecteur \vec{a} . Le terme « corrélation » dans les tableaux V-2 et V-3 correspond au taux d'exactitude de la caractérisation inverse, plus ce terme est proche de la valeur 1 plus la caractérisation inverse est bonne et plus la courbe modélisée est proche de la courbe expérimentale.

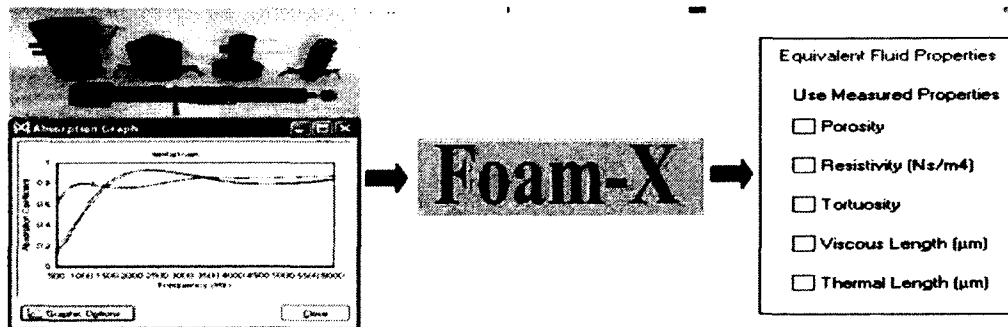


Figure V-1: Principe de fonctionnement de *Foam-X*

Afin de minimiser l'erreur qui peut provenir du calcul inverse, on impose les valeurs de la porosité et de la résistivité. Ces valeurs sont obtenues par des mesures directes faites sur les mousses tel que présenté au chapitre précédent. Dans le tableau V.1, on présente les différentes valeurs de la porosité et de la résistivité correspondants aux trois grades de mousses de Nickel et d'Inox. Les tableaux V.2 et V.3 présentent respectivement les propriétés obtenues par *Foam-X* pour les mousses de Nickel à petits pores et celles d'Inox à gros pores, et ce pour différents niveaux d'excitation sonore. On remarque une certaine différence entre les deux matériaux surtout au niveau de l'ordre de grandeur des longueurs caractéristiques thermique et visqueuse. Au niveau des mousses d'Inox ses deux valeurs, qui sont liées directement aux pertes visqueuses et thermiques, sont très élevées et l'onde sonore est atténuée par ces deux types de pertes au cours de son passage au sein du matériau. Ce constat nous laisse penser que ce matériau est un très bon absorbeur sonore, ce qui n'est pas le cas d'après les courbes d'absorptions. A ce niveau, il est légitime d'avoir un certain doute par rapport à l'exactitude de la caractérisation de ce matériau.

Tableau V.1: Mesure directe de la porosité et la résistivité

		Petit (P)	Moyen (M)	Gros (G)
Nickel	porosité	0,88	0,9	0,93
	Résistivité (N.s.m ⁻⁴)	52145	21997	9159
Inox	porosité	0,58	0,7	0,79
	Résistivité (N.s.m ⁻⁴)	3889928	2146741	637540

Tableau V.2: Caractérisation inverse par *Foam-X* des mousses de Nickel à petits pores

SPL	porosité	résistivité (N.s.m ⁻⁴)	tortuosité	VL (µm)	TL (µm)	corrélacion
110dB	0.88	52145	1.65	49.4	83.1	0,99985
120dB	0.88	52145	1.50	41.8	80.1	0,99983
130dB	0.88	52145	1.52	41.8	82.7	0,99984
140dB	0.88	52145	1.1	21.6	130.3	0,99987
150dB	0.88	52145	1	18.6	127.7	0,99986
160dB	0.88	52145	1	18.6	127.8	0,99986

Tableau V.3: Caractérisation des mousses d'Inox à gros pores

SPL	porosité	résistivité (N.s.m ⁻⁴)	tortuosité	VL (µm)	TL (µm)	corrélation
110dB	0.80	637540	1	1869.4	2917.5	0,99955
120dB	0.80	637540	1	2337.5	3386.2	0,99963
130dB	0.80	637540	1.01	2870.9	7894.9	0,99943
140dB	0.80	637540	1.07	3353.5	5886.6	0,99848
150dB	0.80	637540	1,37	1	28.7	0,99822
160dB	0.80	637540	1,37	1	28.8	0,99818

1) Validation préliminaire des caractérisations

Une bonne caractérisation des mousses permet essentiellement de bien définir le matériau poreux. La validation est basée sur la comparaison entre des simulations faites par le logiciel *Nova* utilisant les résultats des tableaux V.2 à V.3 et des résultats expérimentaux. La validation portera sur les échantillons en Inox à gros pores et ceux en Nickel à petits pores.

En travaillant avec *Nova*, on suppose que la réponse acoustique est linéaire, donc les résultats de simulation sont indépendants du SPL, ce qui n'est pas exactement le cas des mesures expérimentales. Néanmoins, tel que montré au chapitre précédent, la variation en fonction du SPL reste faible et le matériau peut être considéré linéaire. Pour alléger la présentation, la comparaison est réalisée avec les mesures expérimentales à 110dB.

a- Validation pour les mousses de Nickel

La Figure V.2 représente les résultats de mesures expérimentales et de simulations effectuées sur un échantillon de Nickel d'une épaisseur de 12 mm. A la suite, la Figure V.3 montre l'effet de la présence d'une cavité de 10 mm, en arrière de l'échantillon, sur l'exactitude de la caractérisation. À partir des Figures V.2 et V.3, on note une bonne concordance entre la simulation et la mesure expérimentale, avec ou sans cavité. On peut donc conclure que la caractérisation des échantillons de Nickel est bonne malgré une certaine différence au niveau des hautes fréquences. Cette différence peut être due à des phénomènes de diffusion sur le contour de l'échantillon qui apparaissent en général au-delà de 4000Hz.

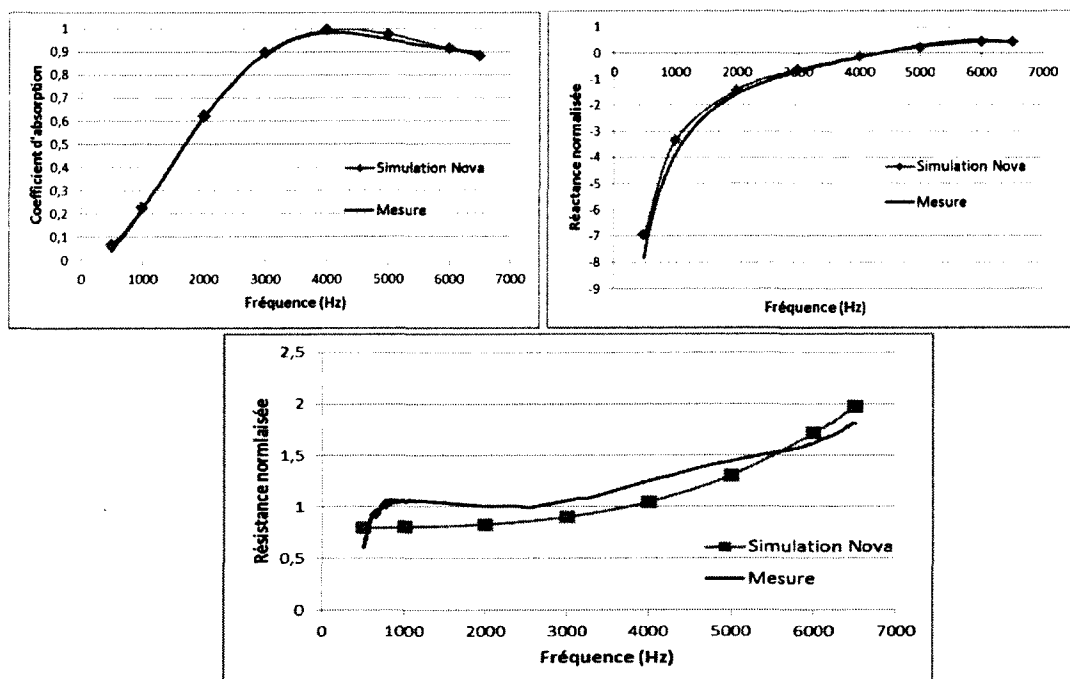


Figure V-2: Comparaison mesure versus simulation (Nova) pour un échantillon de Nickel de 12 mm d'épaisseur, sans cavité

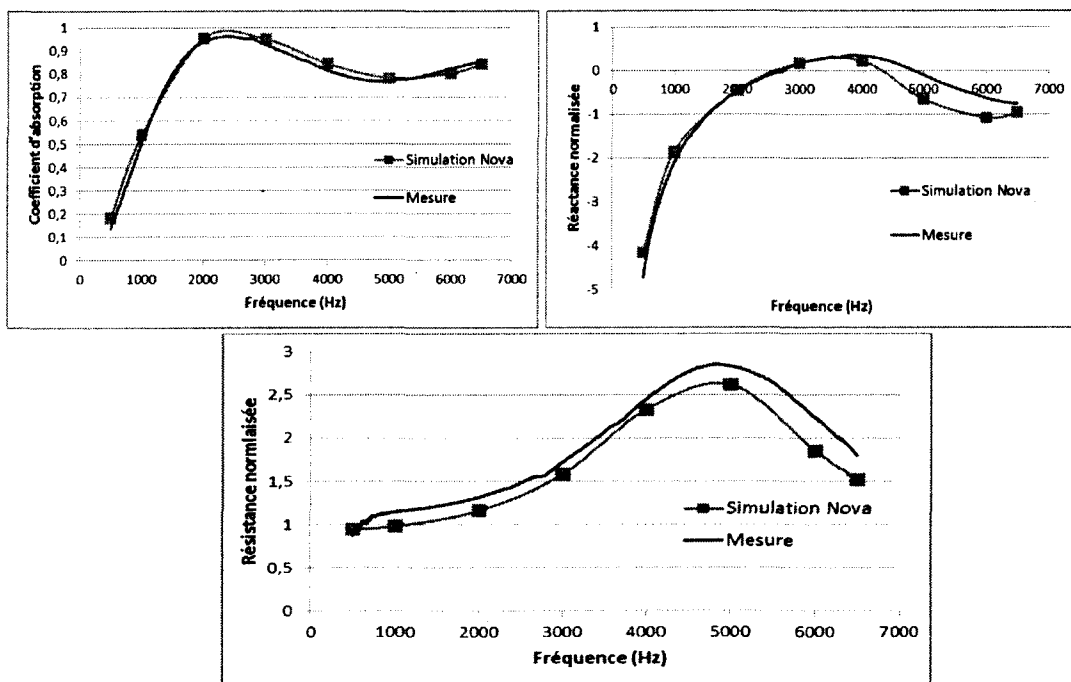


Figure V-3: Comparaison mesure versus simulation (Nova) pour un échantillon de Nickel de 12 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité

b- Validation pour les mousses d'Inox

On compare sur la Figure V.4 les mesures expérimentales et les simulations effectuées sur un échantillon de 12 mm d'épaisseur sans cavité. Comme pour les mousses de Nickel, l'effet de la cavité sur l'exactitude de la caractérisation sera étudié à la Figure V.5. Ici, une cavité de 10 mm est utilisée.

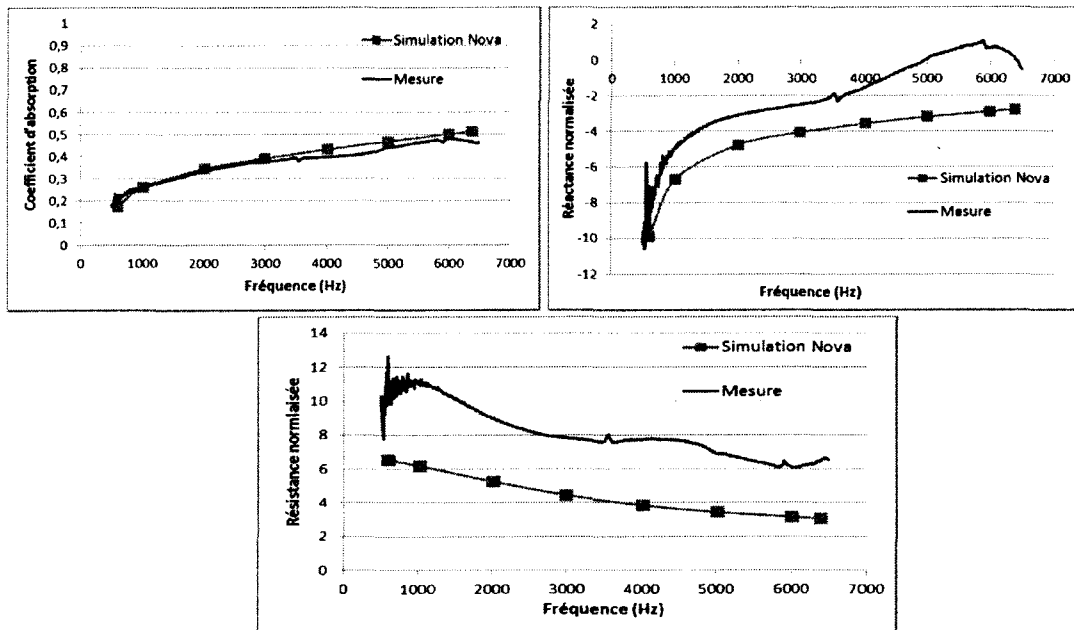


Figure V-4: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 12 mm d'épaisseur, sans cavité

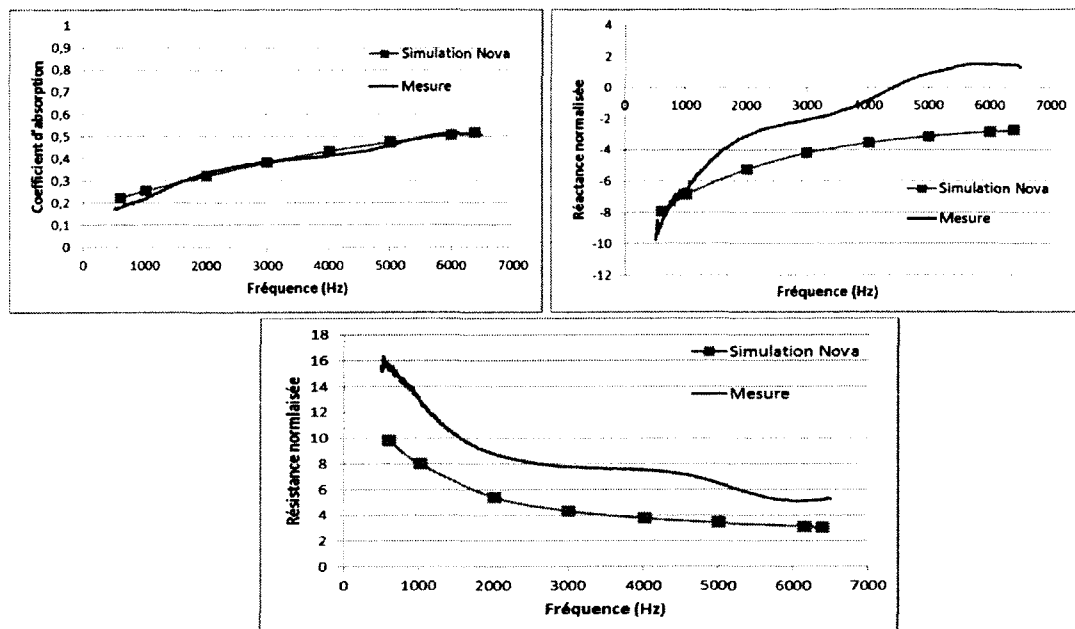


Figure V-5: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 12 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité

Contrairement aux mousses de Nickel, les échantillons en Inox présentent une grande divergence entre les résultats simulés par *Nova* et les résultats expérimentaux.

On estime que cette divergence peut être due à 3 facteurs :

- La mesure de la résistivité.

En effet, pour un matériau très résistif, la mesure de la résistivité peut être erronée à cause des fuites latérales entre l'échantillon et la paroi du porte échantillon du résistivimètre;

- Le logiciel d'inversion *Foam-X* utilisé pour la caractérisation.

- Premièrement, pour l'inversion, *Foam-X* utilise des courbes d'absorption. Comme le montre la Figure V.6, tirée de la référence [Atalla et Panneton, 2005], la courbe d'absorption idéale pour l'inversion doit contenir les trois zones indiquées, ce qui n'est pas le cas des courbes d'absorptions de l'Inox;
- Deuxièmement, la profondeur de pénétration d'une onde sonore est la distance que parcourt celle-ci avant d'être complètement atténuée. Dans le cas des mousses d'Inox, et comme on peut le voir sur la Figure V.7, une résistivité assez importante empêche l'onde de transiter à travers toute l'épaisseur du matériau. Donc, la vraie distance parcourue par l'onde ne correspond pas à l'épaisseur du matériau qui est une donnée essentielle alimentant l'inversion par *Foam-X*;

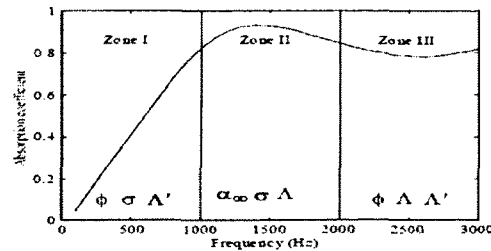


Figure V-6: Forme idéale de la courbe d'absorption pour l'inversion avec Foam-X

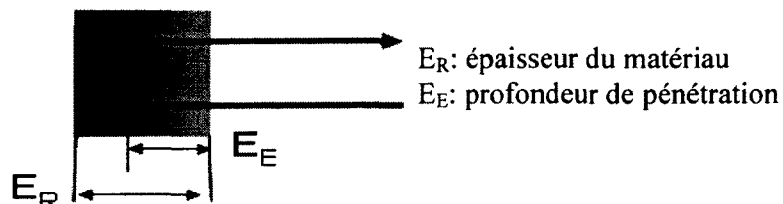


Figure V-7: Profondeur de pénétration

- La microstructure de la mousse

En visualisant un échantillon d'Inox de 4 mm d'épaisseur au microscope optique avec un grossissement de 8 fois (voir Figure V.8), on remarque l'existence d'une porosité fermée en plus de celle ouverte. La méthode de mesure de la porosité qu'on a utilisée (mesure du poids et utilisation de la densité du squelette) permet de déterminer la porosité totale. Donc la valeur de la porosité imposée dans *Foam-X* est surestimée vu que le logiciel n'utilisant que la valeur de la porosité ouverte.

Afin améliorer la caractérisation des mousses d'Inox, on a réalisé des mesures avec des échantillons de 2 et de 4 mm d'épaisseur. On a suivi la même procédure que pour les échantillons de 12 mm : mesure, caractérisation avec *Foam-X*, pour enfin comparer les résultats expérimentaux avec les simulations de *Nova*.

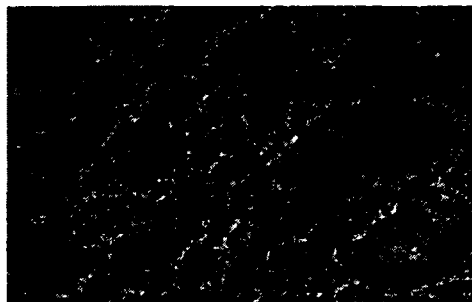


Figure V-8: Microstructure de la mousse d'Inox avec un grossissement de 8 fois

2) Nouvelle caractérisation des mousses d'Inox

Suite aux comparaisons précédentes peu concluantes, une nouvelle caractérisation inverse des mousses d'Inox est faite sur des échantillons plus minces, soit de 2 et 4 mm d'épaisseur. Ce choix est fait pour minimiser l'effet de la profondeur de pénétration de l'onde. De plus, la stratégie d'inversion suivie pour les mousses de 12 mm d'épaisseur est légèrement modifiée. En effet, au lieu de contraindre *Foam-X* avec les valeurs expérimentales de la porosité et de la résistivité, on a fixé des limites pour chaque paramètre. Ces limites sont présentées au Tableau V.4. Ces limites se basent notamment sur le fait que la porosité était avait une surestimation, et la résistivité sous-estimée.

Dans le Tableau V.5 suivant on présente la comparaison entre la caractérisation des échantillons de 12 mm et celle avec une épaisseur de 2 et 4 mm.

Tableau V.4: Limite pour les différents paramètres macroscopiques

Limites pour chaque paramètre
$0.4 < \varnothing < 0.6$
$1000000 < \sigma < 5000000$
$1 < \alpha < 10$
$1 < \Lambda < 500$
$1 < \Lambda' < 500$

Tableau V.5: Comparaison entre la caractérisation des échantillons de 12 mm et celle avec une épaisseur de 2 et 4 mm.

Caractérisation 12 mm	Caractérisation 2 et 4 mm
$\varnothing = 0.8$	$\varnothing = 0.4569$
$\sigma = 637540 \text{ N.s.m}^{-4}$	$\sigma = 3879914 \text{ N.s.m}^{-4}$
$\alpha = 1$	$\alpha = 3.95$
$\Lambda = 2356 \text{ e-6 m}$	$\Lambda = 6.6 \text{ e-6 m}$
$\Lambda' = 4732 \text{ e-6 m}$	$\Lambda' = 36.6 \text{ e-6 m}$

3) Validation de la caractérisation des échantillons de 2 et 4mm

On va comparer dans cette partie les courbes d'absorption, de réactance et de résistance mesurées et simulées avec le logiciel *Nova*, et cela pour le cas avec un fond rigide et dans le cas où on a placé une cavité de 10 mm en arrière de l'échantillon.

a- Validation pour les échantillons de 4 mm d'épaisseur

A partir de la nouvelle caractérisation des mousses d'Inox à 4 mm, on a simulé le comportement acoustique de ces dernières avec le logiciel *Nova*. La validation est réalisée en comparant les simulations avec les mesures expérimentales sur les Figures V.9 et V.10. On remarque que pour la nouvelle caractérisation, l'allure des courbes expérimentales et simulées est semblable, et on a la même tendance malgré une certaine différence surtout lorsqu'il s'agit de placer une cavité en arrière de l'échantillon.

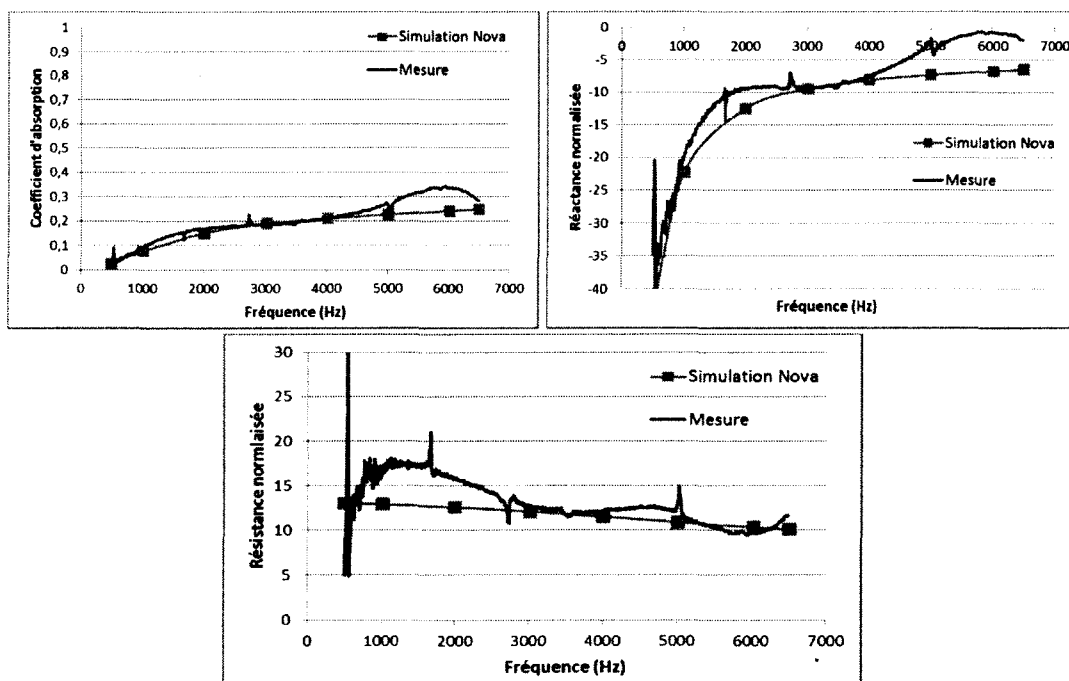


Figure V-9: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 4 mm d'épaisseur, sans cavité

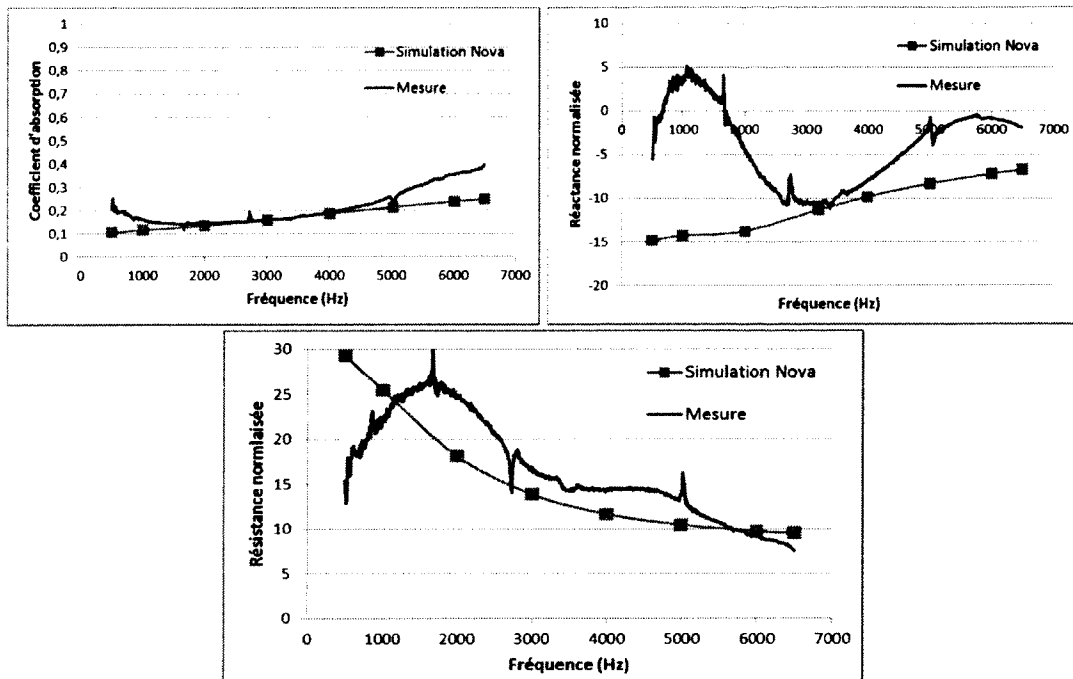


Figure V-10: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 4 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité

b- Validation pour les échantillons à 2 mm d'épaisseur :

Dans cette partie on suivra le même cheminement réalisé précédemment dans le cas de la validation pour les échantillons d'Inox à 4 mm. On comparera les résultats de simulation *Nova* avec les courbes expérimentales réalisées avec un échantillon de 2 mm d'épaisseur. Pour les mousses d'Inox de 2 mm d'épaisseur, la caractérisation semble bonne si on se limite à la validation avec les mesures sans cavité présentées sur la Figure V.11. Par contre la représentation des courbes acoustiques de la mousse d'Inox à 2 mm en présence d'une cavité en arrière de l'échantillon sur la Figure V.12, montre une divergence importante entre les résultats de simulation et les mesures. En effet, pour une épaisseur comparable à la taille des pores, le matériau n'est plus représentatif.

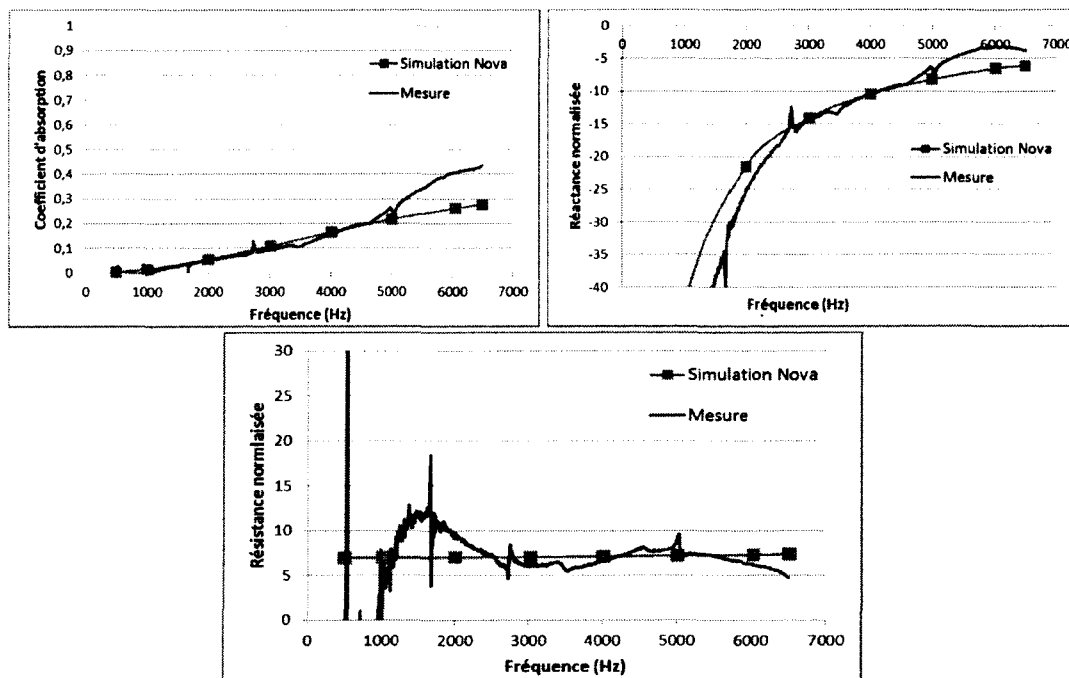


Figure V-11: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, sans cavité

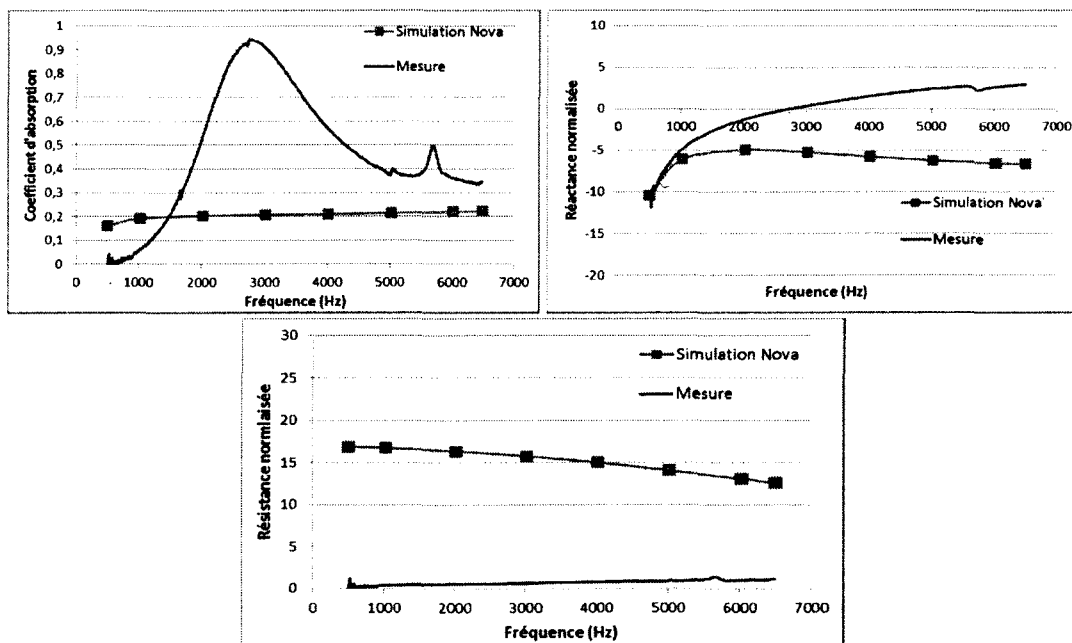


Figure V-12: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité

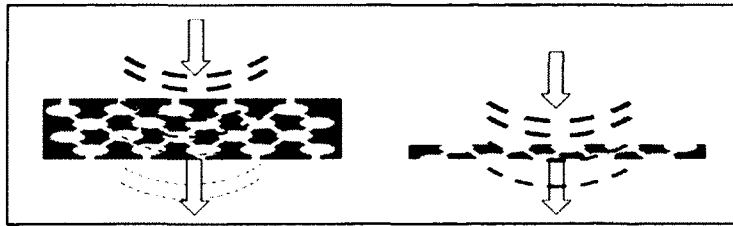


Figure V-13: Illustration de l'importance de l'épaisseur au niveau de l'absorption

Pour une épaisseur assez importante, l'onde acoustique traverse le matériau en passant par les fenêtres puis les pores. Dans le cas où l'épaisseur de l'échantillon est faible, l'onde passe directement d'un pore à l'autre pour se retrouver de l'autre côté du matériau. Ceci implique une perte au niveau de la résistivité du matériau (voir Figure V.13).

Dans le cas des mousses d'Inox de 2 mm, il existe des pores dont la taille est comparable à l'épaisseur de l'échantillon. Ceci est visible si on compare les observations microscopiques des échantillons de 2 et 4 mm, voir la Figure V.14.

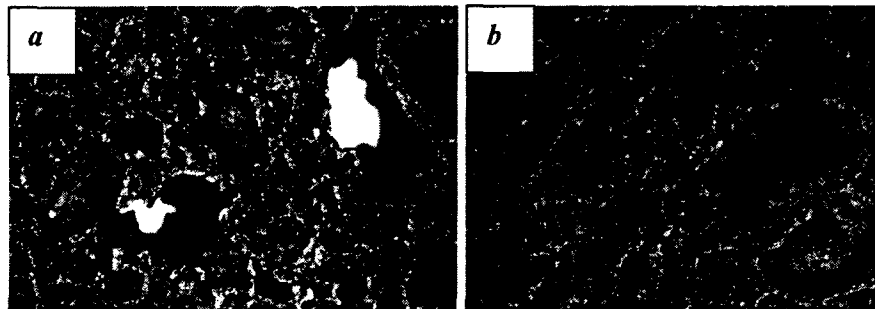


Figure V-14: Microstructure de l'Inox avec grossissement de 8 fois, (a) : échantillon 2 mm, (b) : échantillon 4 mm

Suite aux observations précédentes, on soupçonne :

- soit un effet de double porosité, vu que pour un échantillon de faible épaisseur, l'hétérogénéité est accentuée;
- soit une ressemblance entre le comportement acoustique de ces mousses d'Inox et celui des plaques perforées.

c- Caractérisation inverse par un modèle de double porosité

L'observation microscopique, à faible grossissement des mousses d'Inox d'épaisseur 2 mm, permet d'avoir une bonne idée sur la microstructure de ce matériau. En effet sur la figure V.14.a, on observe la présence d'un certain nombre de gros pores semblables à des

perforations. Ces pores sont visibles même à l'œil nu lorsque l'échantillon est de faible épaisseur. On peut dire alors qu'en plus des micro-pores, les mousses d'Inox sont constituées de macroporosité. Cette hétérogénéité au niveau de la taille des pores est appelée double porosité. Cette dernière peut gouverner le comportement acoustique du matériau. Quelques études ont été réalisées sur la propagation des ondes dans un matériau à double porosité et sur le comportement acoustique de ce type de poreux. On peut citer le travail de Xavier Olny et Claude Boutin [Olny et Boutin, 2003].

Dans ce qui suit, on essaiera de caractériser les mousses d'Inox à faible épaisseur, avec le modèle double porosité intégré dans *Nova*. Ce modèle est implémenté par les propriétés physiques habituelle du poreux, en plus de la taille de la micro-porosité qu'il appelle « *mesoporosity* ». Les résultats de cette caractérisation sont présentés sur la figure V-15.

Fluid Phase		Solid Phase		Material Properties	
Density :	Tortuosity :	Density :		Name :	Double Porosity with filling Material
1.213 kg/m ³	2	0 kg/m ³		Microporous Material :	inox2mmfinal
Sound Speed :	Viscous c.d. :	Young's Modulus :		Filling Material :	Air
342.2 m/s	2.1e-6 m	0 N/m ²		Mesoporosity :	0.015
Porosity :	Thermal c.d. :	Poisson's Ratio :		Mesoporous Radius :	0.0005 m
0.65	0.0001 m	0		Thickness :	0.002 m
Resistivity :		Damping :			
43000 Nm-4s		0			

Figure V-15: Caractérisation double porosité des mousses d'Inox de 2 mm d'épaisseur

Pour un échantillon d'Inox d'une épaisseur de 2 mm, la résistivité n'est pas très élevée. Ceci nous permet de la mesurer avec le résistivimètre sans risque d'erreur due au phénomène de fuite latérale. Donc au niveau de la caractérisation, on a fixé la valeur de la résistivité mesurée, pour pouvoir trouver les autres propriétés physiques (porosité, tortuosité, longueurs caractéristiques thermique et visqueuse) par un ajustement successif. En effet, en partant des courbes expérimentales, on a varié les propriétés physiques et la taille des micro-pores pour que le comportement acoustique simulé, avec *Nova*, coïncide avec les résultats expérimentaux. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure V.16.

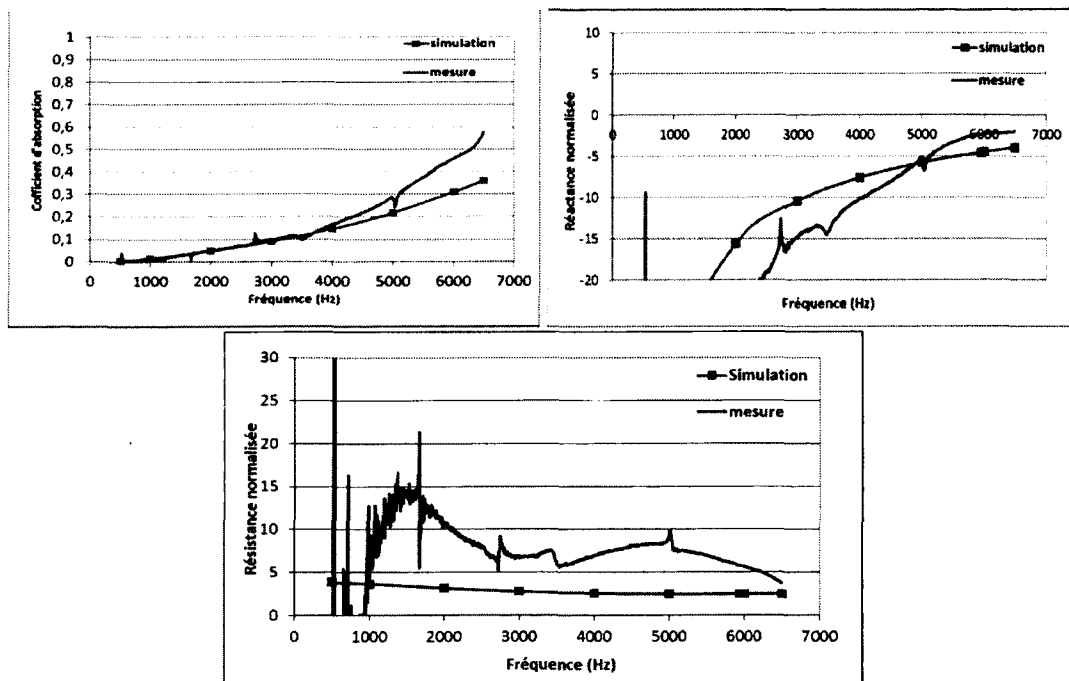


Figure V-16: Comparaison mesure versus simulation double porosité (*Nova*) sans cavité

Les résultats de la validation de cette caractérisation double porosité sont assez bons comparativement à nos résultats précédents, mais on aimerait bien trouver des résultats plus convaincants. Pour cela on passe à la caractérisation des mousses d'Inox de faible épaisseur en tant que plaque perforée.

d- Caractérisation inverse par un modèle de plaque perforée

Une plaque perforée est caractérisée par son taux de perforation et par le diamètre de ses pores. On a développé un script *Matlab* permettant, par un calcul inverse, de déterminer ces deux propriétés à partir de la courbe d'absorption.

On a réalisé l'inversion en utilisant plusieurs modèles : *Atalla-Sgard* [Atalla et Sgard, 2007], *Allard* [Allard et Atalla, 2009] et un modèle *fluide équivalent*. La Figure V.17 est un exemple d'une comparaison mesure-simulation après une caractérisation par inversion avec le modèle d'Atalla-Sgard. En pratique, on implémente le code *Matlab* avec les résultats des mesures d'absorption du matériau en question. Le modèle d'inversion permet de trouver les valeurs du taux de perforation (ϕ) et du diamètre moyen des pores (d) qui permettent aux modèles de prédiction de coller le plus aux résultats expérimentaux.

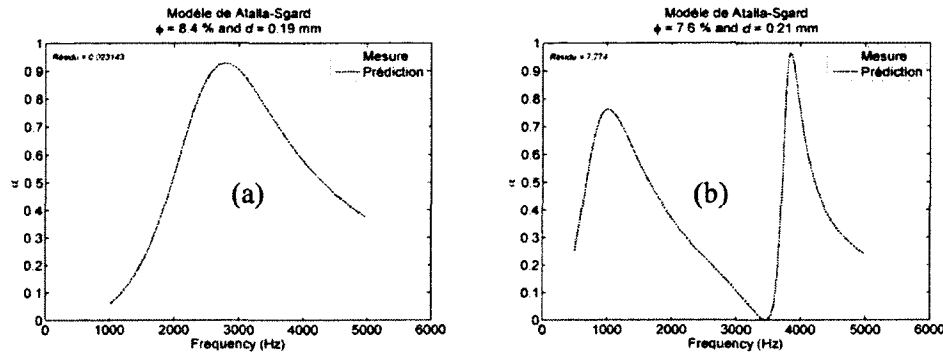


Figure V-17: Résultat de caractérisation par inversion avec le modèle d'Atalla-Sgard pour deux cavités, a) 10mm et b) 50mm

Dans le Tableau V.6, on compare les résultats obtenus avec les différents modèles pour deux profondeurs de cavités : 10 et 50 mm. En réalité la profondeur de la cavité n'a aucun effet sur le taux de perforation et sur le diamètre moyen des pores. Ces deux propriétés dépendent seulement du matériau, et en variant la profondeur de la cavité ces dernières restent inchangées. Donc, pour le même matériau, on s'attend à trouver des valeurs du diamètre et du taux de perforation qui ne varient pas énormément avec le modèle et avec la profondeur de la cavité. Ceci est vérifié dans les résultats du tableau V.6. Les valeurs moyennes du taux de perforation et du diamètre des pores sont respectivement : 7.33 % et 0.26 mm.

À partir d'une image par microscopie optique de notre échantillon, on a mesuré la taille réelle de plusieurs pores ouverts, pour calculer un diamètre moyen de 0.284 mm.

La figure V.18.a est un cliché au microscope optique de notre échantillon. Il nous a permis de valider la caractérisation par inversion. En effet, pour le diamètre de perforation, les valeurs réelles et prédite par les modèles sont très proches. La figure V.18.b est une plaque perforée qui présente le même taux et diamètre de perforation que notre matériau réel.

À partir de la caractérisation inverse du taux de perforation (ϕ) et du diamètre (d) de perforation, on voit bien que les modèles arrivent à bien estimer la taille des pores. En ce qui nous concerne on s'intéressera au modèle de fluide équivalent vu que le logiciel *NOVA* se base à son tour sur ce dernier.

Tableau V.6: Caractérisation de la mousse en tant que plaque perforée avec différents modèles

Cavité (mm)	Modèle	\emptyset (%)	d (mm)	Résidu
10	<i>Atalla-Sgard</i>	8.4	0.19	0.0231
	<i>Allard</i>	6.1	0.26	0.0637
	<i>Fluide équivalent</i>	8.4	0.26	3,9525
50	<i>Atalla-Sgard</i>	7.6	0.21	7.774
	<i>Allard</i>	5.7	0.31	8.957
	<i>Fluide équivalent</i>	8,1	0.33	18,0146

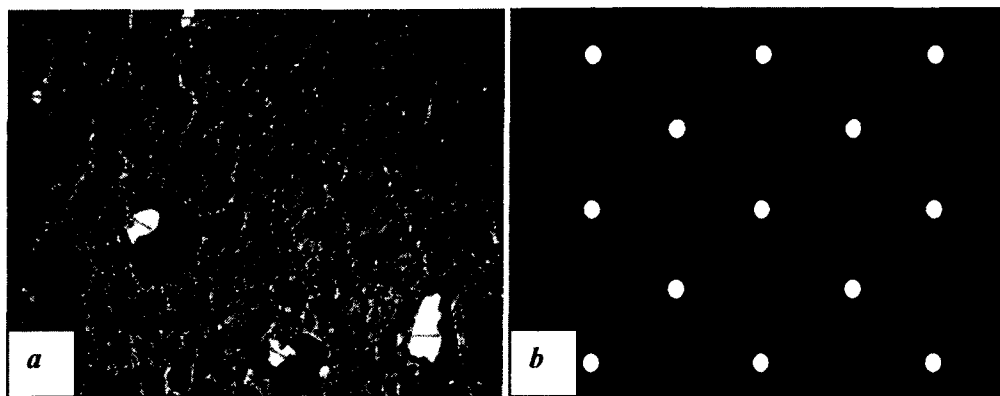


Figure V-18: Représentation de la mousse d'Inox en tant que plaque perforée, (a) : taille moyenne des pores 0,284 mm, (b) : taille de perforation 0,26 mm

E- Validation des résultats de caractérisation de la mousse d'Inox en tant que plaque perforée

À partir des simulations avec deux cavités différentes de 10 et 50 mm sur les Figures V.19 et V.20, on peut dire que la mousse d'Inox de 2 mm d'épaisseur se comporte bien comme une plaque perforée.

Malgré le fait que la mousse d'Inox n'ait pas une absorption large bande comme pour la mousse de Nickel, ce résultat reste intéressant puisque la mousse d'Inox pourrait être un substitut à des plaques perforées dans un liner traditionnel. Peut-être même qu'il serait plus facile de fabriquer ce type de mousse comparativement aux plaques perforées qui nécessitent un usinage précis et coûteux des perforations. En plus de ça, au niveau du poids on gagne beaucoup en utilisant un matériau de porosité élevée par rapport à des plaques denses. Effectivement, puisque la porosité totale est de l'ordre de X%, seulement 1-X% de matière première est nécessaire. Donc un gain éventuel en coût de matière première et de poids.

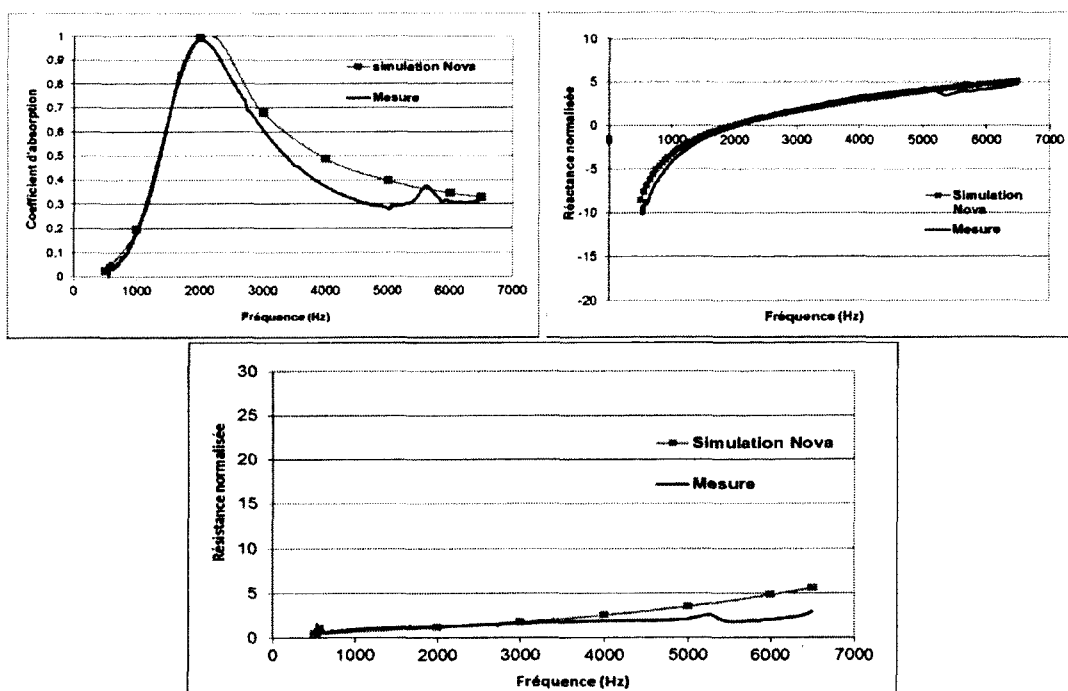


Figure V-19: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, avec 10 mm de cavité

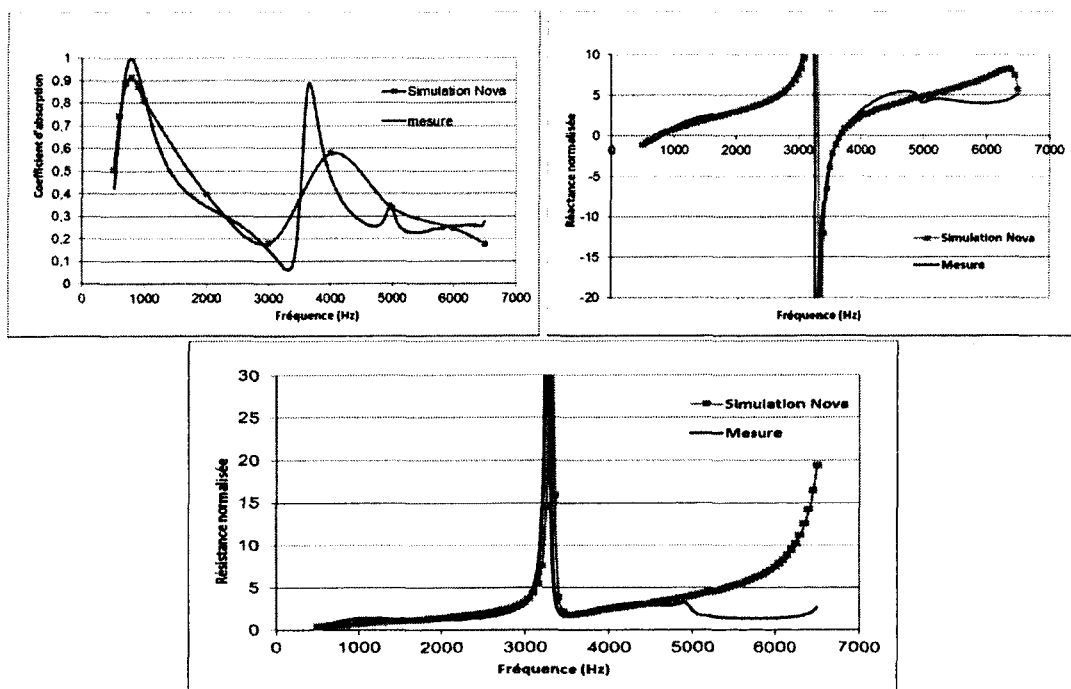


Figure V-20: Comparaison mesure versus simulation (*Nova*) pour un échantillon d'Inox de 2 mm d'épaisseur, avec 50 mm de cavité

4) Conclusion générale

La caractérisation des mousses présentée dans ce chapitre est une partie cruciale du projet. En effet, les simulations qui suivront dans le chapitre VI s'appuieront sur la pertinence et l'exactitude des propriétés physiques de nos matériaux.

Tableau V.7: Valeurs moyennes des propriétés physiques de la mousse de Nickel

SPL	porosité	résistivité (N.s.m ⁻⁴)	tortuosité	VL (µm)	TL (µm)	Corrélation
110dB	0.88	52145	1.65	49.4	83.1	0,99985
120dB	0.88	52145	1.50	41.8	80.1	0,99983
130dB	0.88	52145	1.52	41.8	82.7	0,99984
moyenne	0.88	52145	1.55	44.3	81.9	0,99983

En ce qui concerne les mousses de Nickel, nous avons montré qu'elles se caractérisent comme des mousses à pores ouverts suivant le modèle de Johnson-Champoux-Allard, avec des propriétés variant peu en fonction du niveau de pression sonore jusqu'à 130 dB au moins. En conséquence, elles seront modélisées comme des mousses à comportement linéaire avec les propriétés moyennes présentées au Tableau V.7.

Pour les mousses d'Inox, le travail était plus délicat vu que la microstructure de ces dernières n'était pas semblable aux mousses de Nickel. En effet, on a remarqué que la porosité est en partie fermée en plus d'une hétérogénéité au niveau de la taille et de la distribution des pores. Mais en travaillant avec des échantillons de mousse d'Inox de faible épaisseur, on arrive à les comparer avec des plaques perforées au niveau de leur comportement acoustique. Le Tableau V.8 présente les propriétés de la mousse d'Inox de 2 mm caractérisée en tant que plaque perforée. Pour les simulations on utilisera la moyenne de résultats d'inversion obtenus avec des cavités de 10 et 50 mm.

Tableau V.8: Valeurs moyennes de la caractérisation de l'Inox en tant que plaque perforée

Modèle	Cavité (mm)	Ø(%)	d (mm)
Fluide équivalent	10 mm	8.4	0,26
	50 mm	8,1	0.33
	moyenne	8,25	0.295

VI. SIMULATION

Après avoir caractérisé les mousses de Nickel et d'Inox, on peut maintenant se lancer dans les simulations de concepts de *liners* intégrant ces deux dernières. Les concepts qu'on simulera sont inspirés des *liners* conventionnels déjà utilisés. On en aura ainsi quelques uns qui seront semblables aux *liners* à un degré de liberté (*SDOF*) et d'autres à deux degrés de liberté (*DDOF*).

Pour les mousses de Nickel on profitera de leur caractéristique d'absorption large bande, tandis que celles en Inox seront traitées comme substituts aux plaques perforées.

1) Concepts intégrant la mousse de Nickel

a- Concept à un degré de liberté (*SDOF*)

Comme illustré à la Figure VI.1, un *liner* conventionnel à un degré de liberté est constitué de la succession d'une plaque perforée, d'une cavité (constituée en réalité d'un panneau de nid d'abeille) et d'un fond rigide. Pour commencer, on étudiera l'effet de la mousse de Nickel seule lorsqu'elle prendra la place de la cavité et de la plaque perforée. Ce dernier est appelé *concept a*. Pour les concepts *b* et *c*, la mousse de Nickel prendra respectivement la place de la plaque perforée et de la cavité d'air. On note que les différents concepts ont une épaisseur totale égale au *liner* conventionnel (i.e., 27 mm).

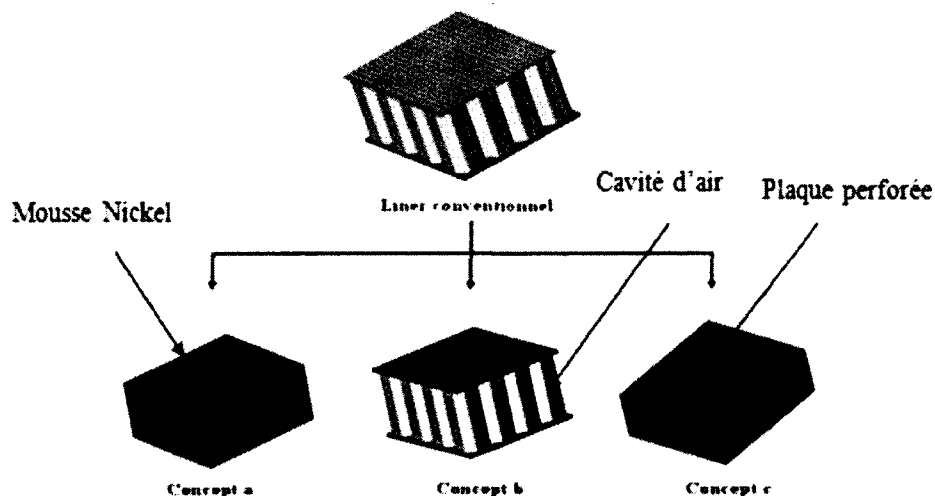


Figure VI-1: *Liner* conventionnel à 1 degré de liberté (*SDOF*) vs 3 concepts équivalents à base de mousse de Nickel

Afin d'avoir une idée sur l'effet de la mousse, on comparera les résultats de simulations de nos concepts obtenus avec *Nova* aux résultats expérimentaux du *liner* conventionnel *SDOF*.

On présente sur la Figure VI.2 les courbes d'absorption, de résistance et de réactance des trois concepts simulés et du *liner* conventionnel qui sera appelé *HC+ MPPB* (pour *HoneyComb* + *MicroPerforated Plate B*). Le Tableau VI.1 présente les dimensions des concepts *a*, *b* et *c*, et le Tableau VI.2 présente les propriétés de la plaque perforée *B* appelée *MPPB*.

Tableau VI.1: Constitution et dimension des différents concepts *SDOF*

N° du concept	Composition du concept
Concept <i>a</i>	27 mm mousse
Concept <i>b</i>	1 mm mousse – 26 mm HC
Concept <i>c</i>	1 mm PP – 26 mm mousse

PP: Plaque Perforée *HC*: corps caverneux (*honeycomb*)

Tableau VI.2: Propriétés de la plaque perforée *MPPB*

Taux de perforation (%)	4,68
Diamètre de perforation (mm)	1,5
Masse volumique (kg/m³)	2700

En comparant les performances des trois concepts proposés, on remarque que le comportement large bande apparaît quand la mousse représente la première couche (côté excitation). Ce comportement apparaît surtout pour la mousse seule (concept *a*), et à moindre mesure, pour la fine couche poreuse (concept *b*). Il semble donc que ce comportement est proportionnel avec l'épaisseur de la mousse : plus l'épaisseur de la mousse est importante plus l'absorption est large bande. Pour le *concept a* formé seulement de mousse, le coefficient d'absorption est supérieur à 80% sur toute la plage fréquentielle à partir de 1500Hz.

Au niveau des courbes de réactance, le point de passage par zéro correspond à la fréquence du pic d'absorption. Pour la résistance, on a le même constat que pour l'absorption, vu que la résistance augmente aussi avec l'épaisseur du matériau. Ceci est tout à fait normal puisque l'onde a plus de difficulté pour passer à travers toute l'épaisseur du matériau lorsque celui-ci est plus épais.

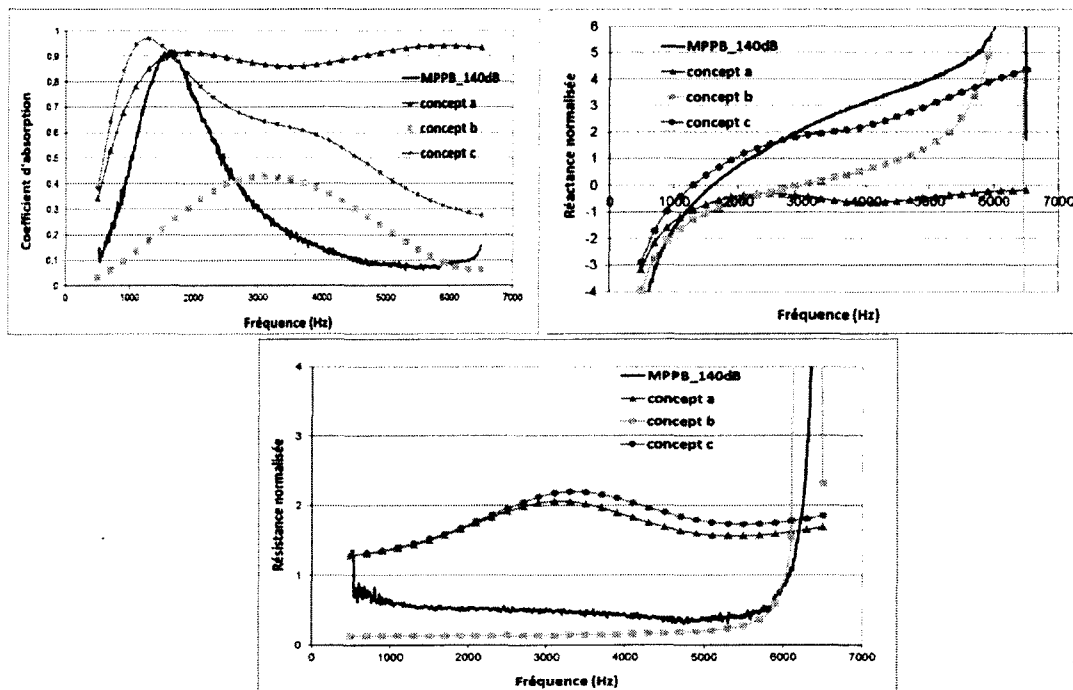


Figure VI-2: Comparaison des performances acoustiques concepts a, b et c versus *liner* HC-MPPB

En termes d'absorption acoustique, on peut conclure que par rapport au *liner* conventionnel *SDOF*, les *concepts a* et *c* ont des performances acoustiques plus élevées.

En plus des performances acoustiques, pour choisir le concept le plus adéquat à notre utilisation, il faut aussi prendre en compte le poids. Ce dernier est considéré comme un paramètre de taille vue qu'en aéronautique une augmentation de la masse implique nécessairement une dépense d'énergie plus élevée et donc un coût d'utilisation plus important. Le tableau VI.3 présente une comparaison de la masse surfacique des trois concepts et du *liner* conventionnel *HC2-MPPB*.

À la lumière des résultats précédents, il se trouve que le concept *a* et *c* présentent une faiblesse de taille au niveau de leur poids très élevé. Pour le concept *b* le poids est acceptable et l'absorption est large bande mais on n'atteint pas des absorptions acoustiques très élevées.

Tableau VI.3: Masse surfacique des différents concepts

	<i>Liner</i> HC2- MPPB	<i>Concept a</i>	<i>Concept b</i>	<i>Concept c</i>
Masse surfacique (kg/m²)	9,33	28,81	7,827	30,32

b- Concept à deux degrés de liberté (1 DOF avec écran résistif)

Comme on les a déjà définis dans la partie II-1, les *liners* à deux degrés de libertés (1 DOF avec écran résistif) sont formés d'une plaque perforée, de deux corps caverneux séparés par un septum (perforé ou résistif) et d'une plaque rigide. Le rôle de la couche résistive est d'élargir la bande d'absorption. Dans ce qui suit, on essaiera d'intégrer les mousses de Nickel dans des concepts de ce genre pour obtenir trois concepts différents représentés à la Figure VI.3. On fixera une épaisseur constante de 27 mm pour tous les concepts et pour le *liner* conventionnel.

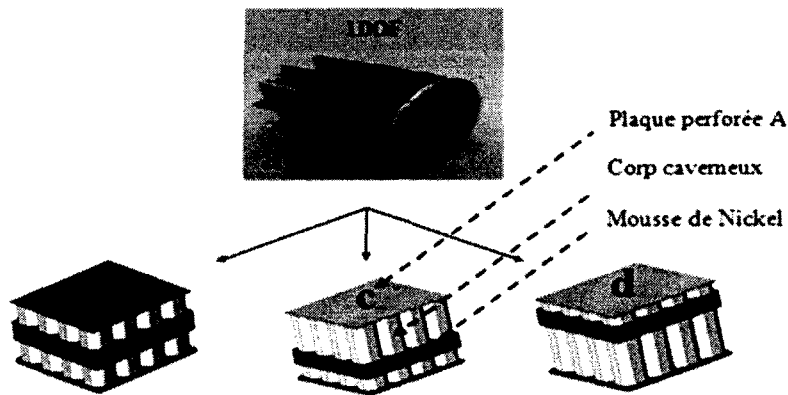


Figure VI-3: Différents concepts à deux degrés de libertés

Dans cette partie, on commencera par une étude comparative entre les différents concepts au niveau des courbes d'absorption, de résistance normalisée et de réactance normalisée, illustrées respectivement par la Figure VI.4. À partir de cette étude comparative, on choisira le concept le plus pertinent pour comparer, par la suite, ses performances acoustiques à celles du *liner* conventionnel (appelé *HC2-MPPA*) comportant une couche résistive. Dans le Tableau VI.4 suivant, on définit les dimensions des différents concepts qu'on simulera

Pour tous les concepts, on a gardé la même épaisseur totale de 27 mm et on a utilisé la même plaque perforée pour pouvoir comparer les résultats obtenus. Le Tableau VI.5 présente les propriétés de la plaque perforée qu'on a utilisée.

Tableau VI.4: Constitution et dimension des concepts à deux degrés de liberté / DOF avec écran résistif

N° du concept	Composition du concept
Concept 1	1 mm PP – 12.5 mm HC – 1 mm mousse – 12.5 mm HC
Concept 2	1 mm PP – 12 mm HC – 2 mm mousse – 12 mm HC
Concept 3	1 mm PP – 7 mm HC – 1 mm mousse – 18 mm HC
Concept 4	1 mm PP – 6 mm HC – 2 mm mousse – 18 mm HC
Concept 5	1 mm PP – 4 mm HC – 2 mm mousse – 20 mm HC
PP: Plaque Perforée HC: corps caverneux (<i>honeycomb</i>)	

Tableau VI.5: Propriétés de la plaque perforée MPPA

Taux de perforation (%)	6,85
Diamètre de perforation (mm)	1,5
Densité (kg/m ³)	2700

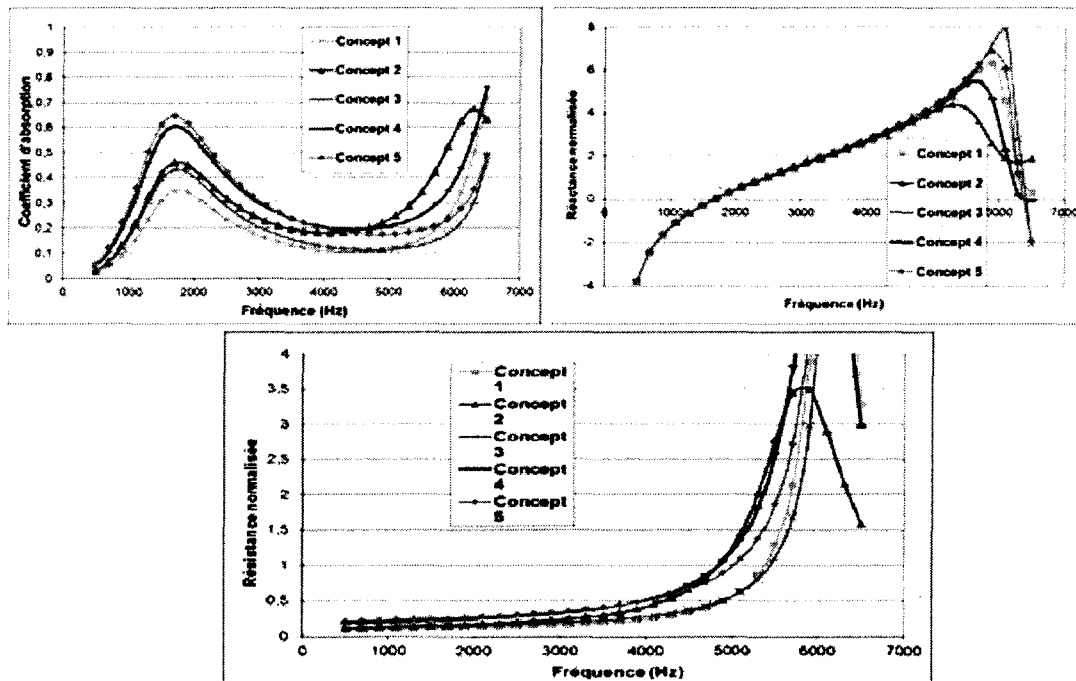


Figure VI-4: Comparaison des performances acoustiques des différents concepts

En partant des courbes d'absorption et de résistance, le concept 5 semble le plus efficace. Ce dernier atteint un maximum d'absorption de 0,65, et il possède la résistance la plus élevée comparativement aux autres concepts. Concernant les courbes de réactance, le point de passage par zéro est le même pour tous les concepts. À partir de cela on peut conclure

que le concept 5 est, acoustiquement parlant, le plus intéressant sur la gamme de fréquences étudiées.

c- Comparaison entre le concept 5 et un *liner* conventionnel 1DOF avec écran résistif

La figure VI-5 constitue la comparaison des performances acoustiques du concept 5 avec celles du *liner* conventionnel HC2-MPPA. Ce dernier comporte une couche résistive et il est représenté dans la figure VI-3.

À partir de la Figure VI.5 et en comparant les coefficients d'absorption du concept 5 à ceux du *liner* HC2-MPPA, on remarque que le maximum d'absorption est presque le même. Par contre, au-delà de ce maximum, le *liner* HC2-MPPA absorbe plus que le concept 5.

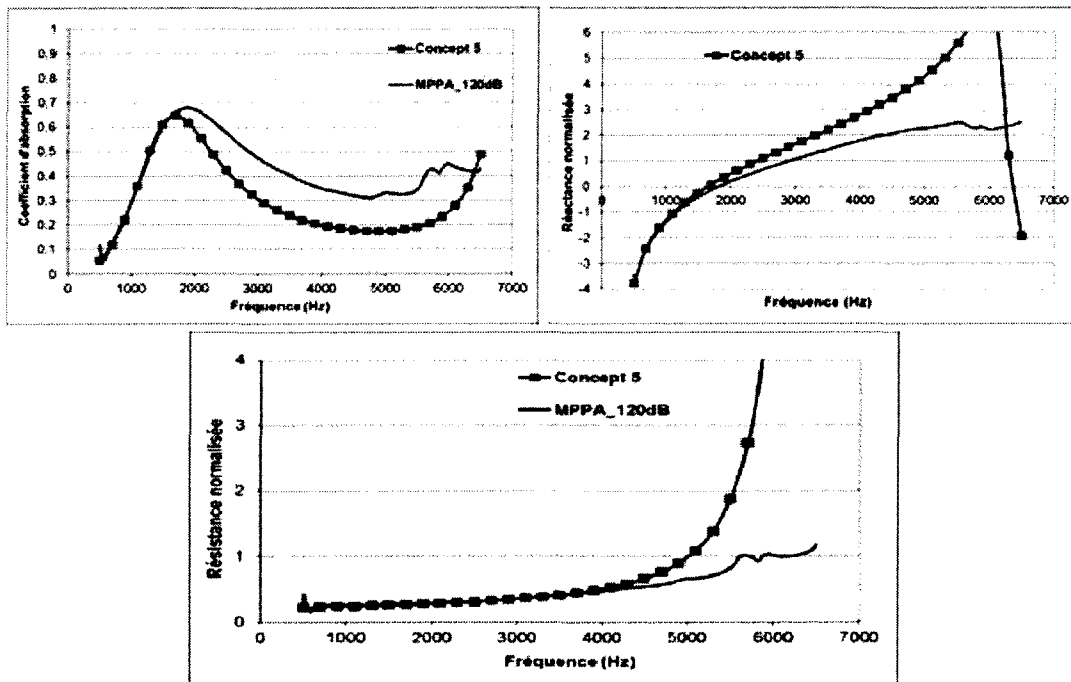


Figure VI-5: Comparaison des performances acoustiques du concept 5 versus le *liner* conventionnel HC2-MPPA

Tableau VI.6: Comparaison des masses surfaciques du concept 5 et du HC2-MPPA

	HC2-MPPA	Concept 5
Masse surfacique (Kg/m ²)	9,088	10,702

Le Tableau VI.6 présente la comparaison des masses surfaciques du concept 5 et du *HC2 MPPA*. Au niveau du poids, le concept présente une certaine faiblesse vue que les 2 mm d'épaisseur de la mousse correspondent à un poids de 2,132 g, auquel il faut ajouter celui de la plaque perforée *MPPA*.

2) Modélisation et optimisation des mousses de Nickel étudiées

Comme on vient de le voir dans ce qui précède, les mousses de Nickel ont un potentiel au niveau de leurs performances acoustiques. Notre étude était basée sur les échantillons fabriqués par l'*IMI* avec des propriétés prédéfinies selon le procédé de fabrication.

Les performances acoustiques ont un lien direct avec les propriétés physiques de la mousse et donc avec le procédé de fabrication. Pour optimiser l'efficacité de la mousse, il faut donc jouer sur le procédé de fabrication.

Pour une utilisation spécifique, il suffirait de définir les propriétés recherchées comme la porosité, la résistivité, la tortuosité et les longueurs caractéristiques thermique et visqueuse. Ceci est facile pour l'utilisateur, mais ça ne l'est pas pour le fabricant : en effet, il est difficile de faire le lien direct entre les propriétés recherchées du matériau et le procédé de fabrication adéquat.

Pour éviter ce problème, on va essayer de trouver un modèle assez simple qui fera le lien entre la microstructure de la mousse et ses propriétés recherchées. Ceci facilitera la tâche pour le fabricant de la mousse et nous permettra d'avoir un matériau optimisé selon l'utilisation recherchée. Dans son travail, *Dominic Pilon* [Pilon et Panneton, 2004] a cherché une relation pouvant faire le lien entre la microstructure et les propriétés acoustiques macroscopiques des mousses en forme de dentelle (voir Figure I.8) fabriquées par l'*IMI*. Il a travaillé sur 5 échantillons de mousses en cuivre. Il s'est basé sur des clichés pris avec un microscope électronique à balayage *MEB* pour mesurer statistiquement la taille des pores et des fenêtres. Le Tableau VI.7 résume les résultats de sa caractérisation microstructurale. En ce qui concerne les propriétés acoustiques, il a réalisé des mesures acoustiques directes dans un tube de Kundt. Dans le Tableau VI.8 on présente les résultats de sa caractérisation acoustique.

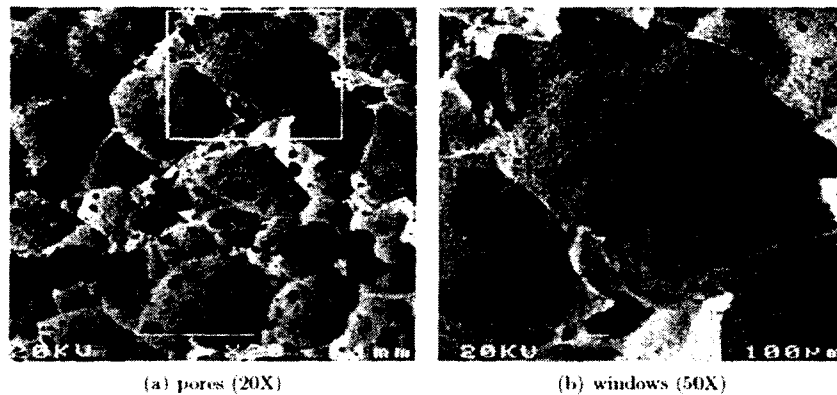


Figure VI-6: microstructure d'une mousse en dentelle de l'IMI, (a) : 20X, (b) : 50X

Tableau VI.7: Propriétés microstructurales des mousses en Cuivre

Metallic foam	Diameters	
	Dw (μm)	Dp (μm)
A	92±51	363±129
B	91±63	305±112
C	101±77	389±148
D	83±40	256±124
E	103±78	676±490
<i>Dw: diamètre des fenêtres Dp: diamètre des pores</i>		

Tableau VI.8: Caractérisation macroscopique des mousses en Cuivre

Propriétés macroscopiques de la mousse de cuivre pour les 5 échantillons							
grade	φ	σ (Ns/m ⁴)	ρl (kg/m ³)	α∞	Λ (μm)	Λ' (μm)	Λ'/Λ
A	0.94	23181	516	1.15	43±15	178±42	4.1
B	0.94	25875	559	1.14	47±16	149±32	4.0
C	0.92	29518	759	1.50	42±5	192±4	4.6
D	0.89	62842	976	1.51	23±1	119±7	5.1
E	0.93	13652	666	1.36	38±1	334±9	8.7

Comme le montre le Tableau VI.9, il s'avère qu'il existe un premier lien direct entre la longueur caractéristique thermique et le rayon des pores et un deuxième entre la longueur caractéristique visqueuse et le rayon des fenêtres. De cette constatation, on en déduit les relations approchées suivantes :

$$\dot{\Lambda} = r_w \quad \text{VI.1}$$

$$\Lambda' = r_p \quad \text{VI.2}$$

Tableau VI.9: Relation micro-macro

Mousse métallique	Window			Pore		
	2Λ (μm)	D_w (μm)	Δw (%)	$2\Lambda'$ (μm)	D_p (μm)	Δp (%)
A	87 ± 29	92 ± 51	5	357 ± 86	363 ± 129	2
B	74 ± 31	91 ± 63	19	297 ± 63	305 ± 112	3
C	83 ± 12	101 ± 77	18	384 ± 83	389 ± 148	1
D	47 ± 2	83 ± 40	44	238 ± 15	256 ± 124	7
E	77 ± 3	103 ± 78	25	667 ± 19	676 ± 490	1

En plus, *Pilon* a donné aux mousses fabriquées par l'IMI un modèle géométrique périodique formé par une sphère dans un empilement rhombique comme première approximation. Si on considère un empilement compact de sphères, on aura une sphère entourée de 12 autres et il aura, à la place de 6 connections, 12 connections interpores comme l'illustre la Figure VI.7 suivante.

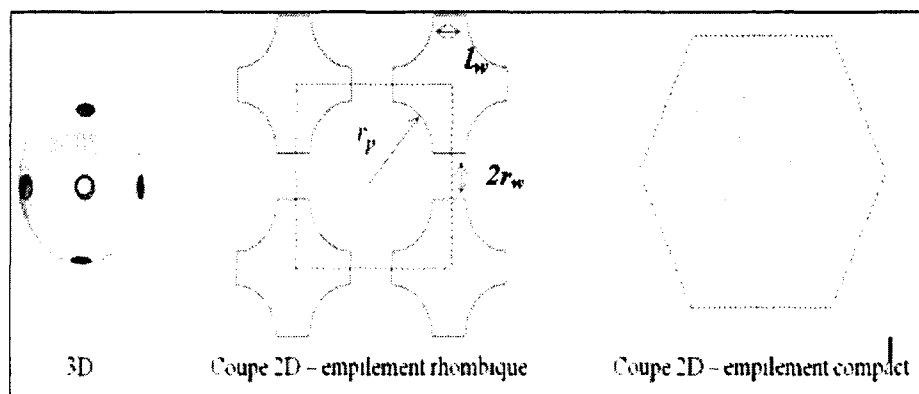


Figure VI-7: Modélisation géométrique des mousses en dentelle de l'IMI

A partir de cette modélisation et des résultats de *Gros* [Gros, 2006] et de *Panneton* [Panneton, 2001], présentés respectivement par les Tableaux VI.10 et VI.11, on peut tirer des constatations et des relations entre les propriétés macroscopiques et la microstructure de la mousse. Ces constatations et relations sont :

Tableau VI.10: Résultats de *Panneton* [Panneton, 2001]

Mousse Nickel	Porosité	Résistivité (Pa.s/m ²)	tortuosité	Longueur caractéristique visqueuse (Λ') μm	Longueur caractéristique thermique (Λ) μm	Λ' / Λ
GR-NI-35-BC	0,891	43456	1,26	22	139	6,4
GR-NI-33-A	0,912	34167	1,15	30	351	11,7

Tableau VI.11: Résultats d'*Emmanuelle GROS* [Gros, 2006]

#	Description	Porosité	Épaisseur des parois r (μm) moyenne \pm écart type	Diamètre des pores d_p (μm) moy. \pm écart type ; mode		Dimensions (mm) ± 0.2 mm			Masse volumique (kg/m ³) ± 25 kg/m ³
				Pores	Fenêtres	L	W	H	
1A	Cu petits pores	0.916 \pm 0.002	91 \pm 26	583 \pm 194; 450	76 \pm 63; 45	50.5	50.6	11.0	750
1B						50.6	50.6	11.0	
2A	Cu-Ag I petits pores	0.89 \pm 0.02	93 \pm 23	587 \pm 145; 450	70 \pm 50; 35	50.8	50.8	11.1	1063
2B						50.8	50.8	10.8	
3A	Cu-Ag II petits pores	0.88 \pm 0.02	65 \pm 14	512 \pm 114; 500	70 \pm 57; 25	50.8	50.6	11.1	1144
3B						50.9	50.8	11.0	
4A	Cu gros pores	0.941 \pm 0.002	184 \pm 64	1706 \pm 388; >2000	73 \pm 48; 45	50.8	50.7	11.0	529
4B						50.8	50.8	10.9	
5A	Cu-Ag I gros pores	0.90 \pm 0.02	194 \pm 51	1660 \pm 364; 1500	67 \pm 41; 45	50.7	50.8	11.0	1001
5B						50.8	50.8	11.1	
6A	Cu-Ag II gros pores	0.93 \pm 0.02	189 \pm 58	1599 \pm 363; 1700	56 \pm 42; 25	50.7	50.7	11.0	713
6B						50.8	50.3	11.0	
7A	Cu petits pores, poudre 2	0.930 \pm 0.002	113 \pm 30	549 \pm 129; 450	66 \pm 53; 35	50.8	50.8	11.0	623
7B						50.7	50.8	11.0	

- 1) la porosité pour ces types de matériaux est d'environ 91% avec quelques variations minimales selon le grade
- 2) à partir des résultats de *Gros*, on peut dire qu'il existe une relation entre la taille des pores et l'épaisseur des parois, de la forme :

$$\frac{r_p}{l_w} = 3.7 \pm 0.75 \quad \text{VI.3}$$

- 3) à partir des résultats de *Gros*, aussi on peut tirer une loi empirique entre le diamètre des pores et des fenêtres, de la forme :

$$\frac{r_p}{r_w} = 7.8 \pm 4.8 \quad \text{VI.4}$$

- 4) à partir des résultats de *Panneton*, il existe un rapport moyen entre les longueurs caractéristiques

$$\frac{\Lambda'}{\Lambda} = 6.4 \pm 2.9 \quad \text{VI.5}$$

Pour avoir un modèle fluide équivalent complet pour les mousses de l'*IMI*, il reste à définir la résistivité et la tortuosité. Pour la résistivité, on considère que l'onde se propage normalement à la surface du matériau et que les pores sont distribués selon un empilement rhombique. La figure VI-8 présente une cellule unitaire périodique et aussi la discrétisation de la sphère en une succession de cylindres.

Ainsi, en utilisant les formules théoriques pour une succession de pores cylindriques, on aura :

$$\sigma = \frac{2\eta}{r_p + \frac{l_w}{2}} \left(2 \frac{l_w}{r_w^2} + \sum_{i=1}^N \frac{l_{pi}}{r_{pi}^2} \right) \quad \text{VI.6}$$

avec η la viscosité dynamique de l'air.

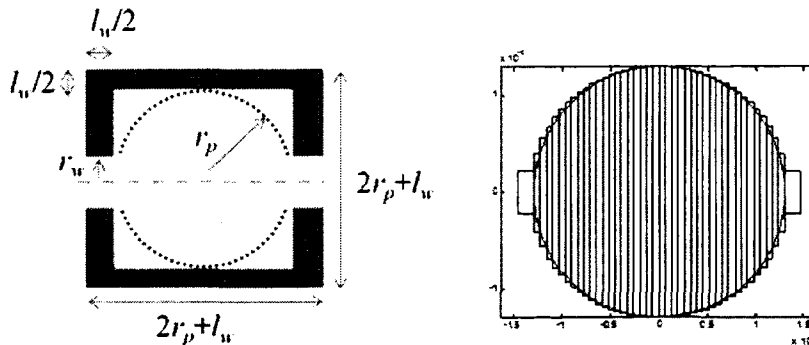


Figure VI-8: Représentation d'une cellule périodique et la discrétisation

Pour la tortuosité, on utilisera une relation simple valide en général pour les empilements de sphères, soit :

$$\alpha_{\infty} = \frac{1}{\phi} \quad \text{VI.7}$$

Pour valider le modèle, on a comparé les résultats théoriques à ceux des mesures qu'on a réalisées sur les mousses de Nickel. Les résultats sont présentés dans le Tableau VI.12.

Tableau VI.12: Comparaison entre le modèle et les résultats de caractérisation par inversion

Propriétés macroscopiques	Résultats théorique (Gros pores)	Résultats expérimentaux (Gros pores)
ϕ	0.91	0,93
σ	7 017	9 159
α_{∞}	1.10	1.04
Λ	56	42.2
Λ'	359	359.3

Ainsi, le modèle fonctionne bien à part quelques ajustements quand les rapports du tableau récapitulatif sont trop loin de la moyenne.

Conclusion

Pour fin d'analyse paramétrique éventuelle, on peut considérer que le modèle développé, se basant seulement sur le rayon des pores, est adéquat. Ceci nous permettra de jouer sur la microstructure pour avoir les propriétés macroscopiques optimisées selon l'utilisation voulue.

Si par exemple, on prend la résistance comme paramètre majeur, pour la faire varier il faut jouer sur l'épaisseur. En effet, ces deux paramètres varient d'une façon proportionnelle. Cependant, en augmentant l'épaisseur, le poids du concept augmente aussi. Avec le modèle qu'on a défini, le problème du poids est résolu, vu que la résistance peut être augmentée en gardant la même épaisseur, mais en diminuant la taille des pores.

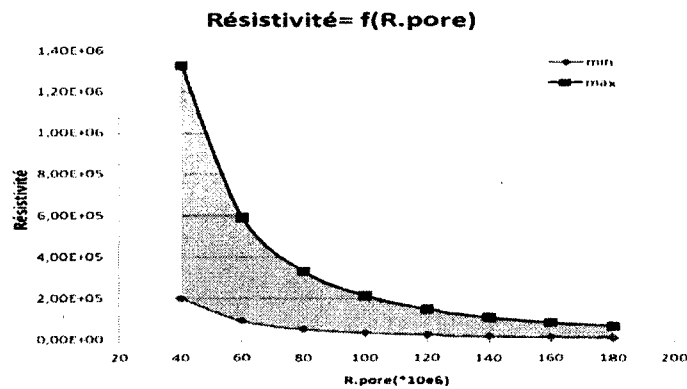


Figure VI-9: Variation de la résistivité en fonction du rayon de pore

La Figure VI.9 présente la plage de variation de la résistivité en fonction du rayon de pore et en tenant compte des incertitudes dues au modèle et au procédé de fabrication.

Dans le cas des mousses de Nickel, les performances peuvent être améliorées en augmentant la résistance. Ceci peut se faire en augmentant l'épaisseur des échantillons, mais cela implique une augmentation du poids. La deuxième approche consiste à diminuer la taille des pores. Cette dernière permettra d'augmenter la résistivité de la mousse et donc sa résistance tout en gardant une épaisseur et poids constants.

Dans les Figures VI.10 et VI.11, on propose d'optimiser les performances respectives du concept *b* choisit pour le *liner* avec un seul degré de liberté et le concept 5 choisi pour le *liner* avec deux degrés de liberté. On aura donc, dans les deux cas, deux mousses de propriétés différentes: la première est la mousse fournie par l'IMI qui a déjà été caractérisée auparavant, et pour la deuxième on a utilisé le modèle précédent pour arriver aux propriétés macroscopiques en partant d'une taille de pore de 60 microns.

À partir des Figures VI.10 et VI.11, on peut dire que les performances des mousses de Nickel peuvent être améliorées en jouant sur la taille des pores. Pour cela, il faut travailler sur le procédé de fabrication pour espérer un jour pouvoir contrôler la taille des pores avec assez de précision.

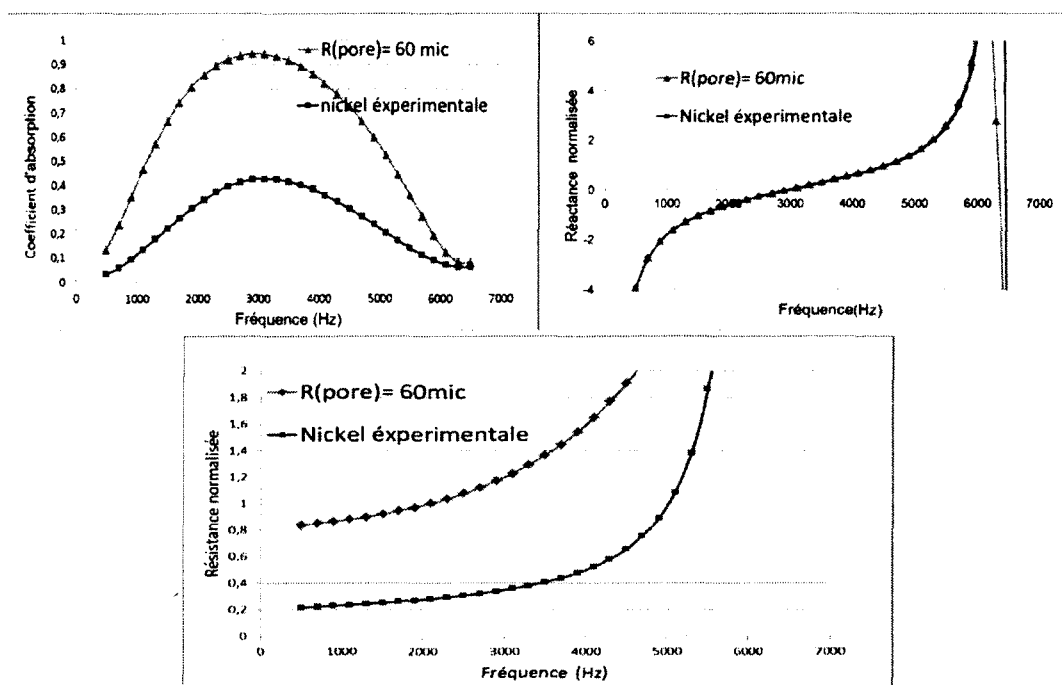


Figure VI-10: Comparaison des performances acoustiques du concept b : mousse expérimentale versus mousse optimisée (R pore = 60 micron)

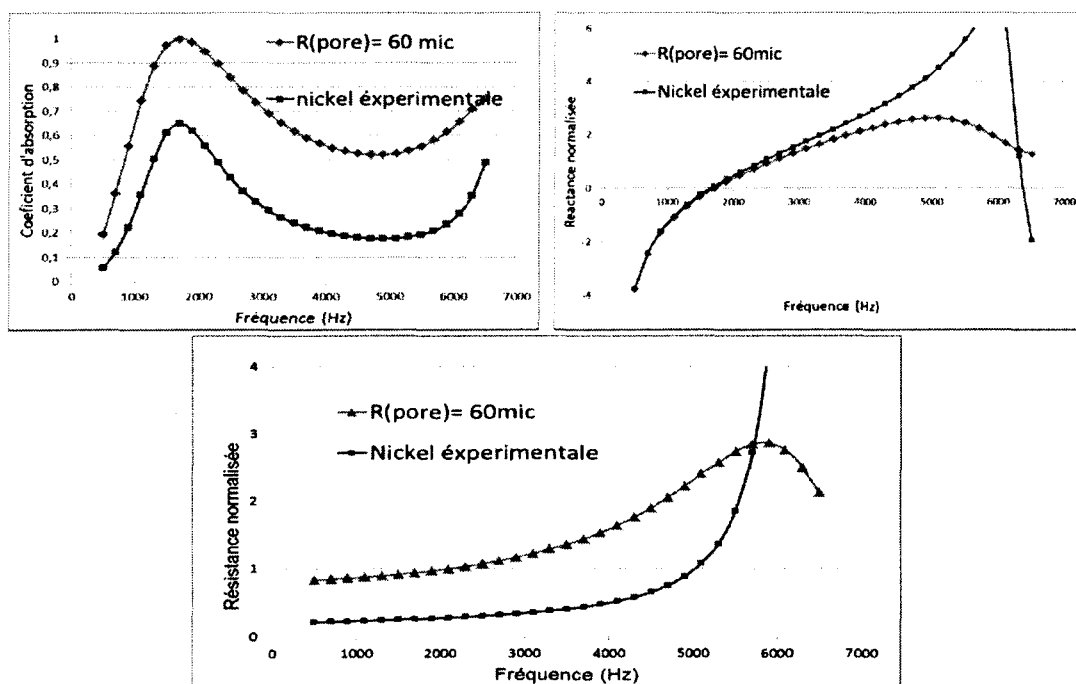


Figure VI-11: Comparaison des performances acoustiques du concept 5 : mousse expérimentale versus mousse optimisée (R pore = 60 microns)

3) Simulation de concepts intégrant la mousse d'Inox

Comme pour le Nickel, les mousses d'Inox seront intégrées dans des concepts à un seul degré de liberté et d'autres à deux degrés de liberté. Mais dans ce cas les mousses d'Inox seront traitées et modélisées en tant que des plaques perforées avec un taux de perforation et un diamètre de pore déterminés à partir des mesures acoustiques. Ceci veut dire qu'on aura à comparer les performances de concepts qui diffèrent seulement par les propriétés de leurs plaques perforées.

a- Concept à un seul degré de liberté (Figure VI.12)

La figure VI.13 est la représentation du concept à un seul degré de liberté, dans la figure à droite la plaque perforée est remplacée par de la mousse d'inox

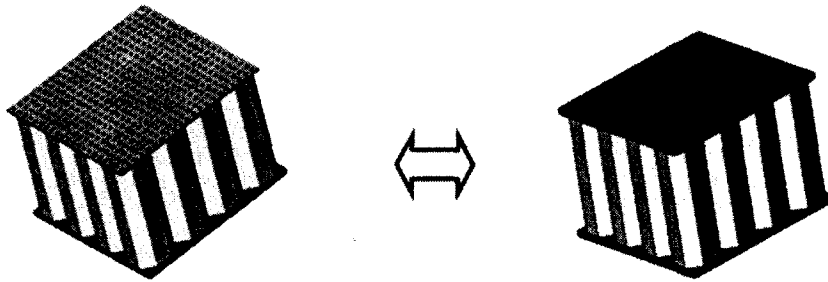


Figure VI-12: Concept à un seul degré de liberté

Le Tableau VI.13 présente les propriétés de la mousse d'Inox considérée comme plaque perforée et de la plaque *MPPB* :

Tableau VI.13: Caractéristiques de la mousse et de la plaque *MPPB*

	MPPB	Mousse d'Inox
Taux de perforation	4,68	8,25
Diamètre des pores (mm)	1,5	0.295
Masse volumique (Kg/m³)	2573	1659

Dans ce qui suit, on comparera les performances acoustiques de trois concepts : pour le premier la plaque perforée est *MPPB* et pour les deux autres, la mousse d'Inox aura deux épaisseurs respectives de 1 et 2 mm. L'épaisseur totale de chaque concept est de 26 mm. Le Tableau VI.14 présente les dimensions des différents concepts.

Tableau VI.14: Constitution et dimension des différents concepts à un degré de liberté *SDOF*

N° du concept	Composition du concept
Concept <i>a</i>	<i>MPPB</i> - 26 mm <i>HC</i>
Concept 1	1 mm mousse – 26 mm <i>HC</i>
Concept 2	2 mm mousse – 25 mm <i>HC</i>

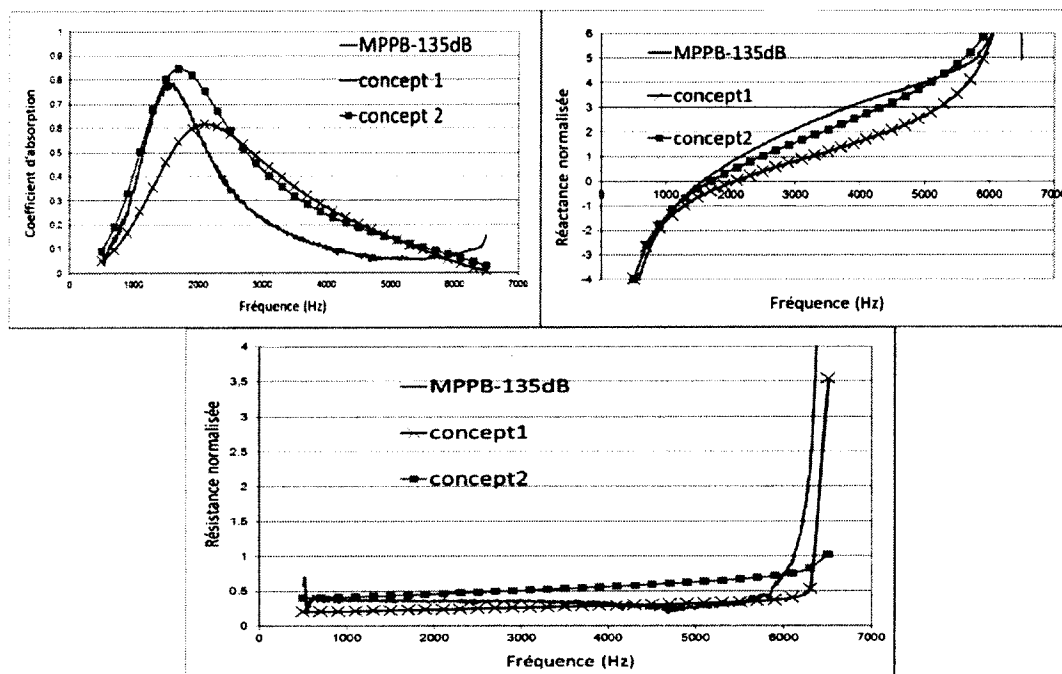


Figure VI-13: Comparaison des performances de nos concepts avec les mesures MPPB à 135dB

Comme on peut le voir sur la Figure VI.13, les performances acoustiques des concepts simulés sont comparables à ceux du *liner* conventionnel à un seul degré de liberté MPPB lorsque celui-ci est soumis à une excitation de 135dB. En augmentant l'épaisseur de la mousse, la résistance du concept croît, d'où l'amélioration des performances acoustiques. Le Tableau VI.15 présente une comparaison de la masse surfacique des différents concepts. Il faut donc trouver un compromis entre l'épaisseur et le poids du concept pour gagner en résistance sans trop alourdir l'ensemble.

Tableau VI.15: Masse surfacique des différents concepts

	MPPB	Concept 1	Concept 2
Masse surfacique (Kg/m ²)	9,09	8,463	9,672

b- Concept à deux degrés de liberté (Figure VI.14)

Pour les systèmes à deux degrés de liberté, l'emplacement de la deuxième plaque perforée (et donc les dimensions des cavités), influe sur les performances acoustiques du concept.

On étudiera quatre concepts qui diffèrent par la disposition de la deuxième plaque perforée tout en gardant fixe l'épaisseur totale du concept. Dans le Tableau VI.16 sont définies les dimensions des cavités.

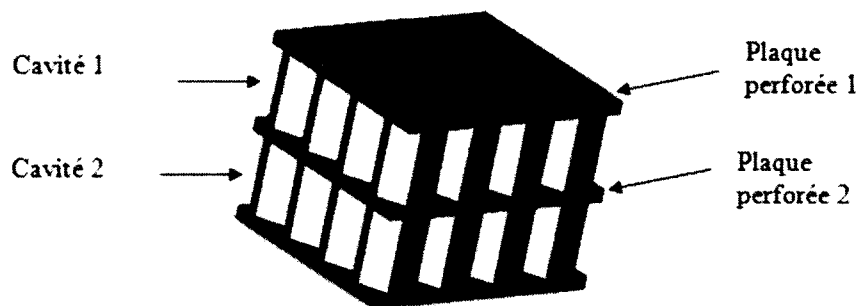


Figure VI-14: Concept à deux degrés de liberté

Tableau VI.16: Constitution et dimension des différents concepts à deux degrés de liberté DDOF

	Composition du concept
Concept 3	1 mm mousse – 12,5 mm HC – 1 mm mousse – 12,5 mm HC
Concept 4	1 mm mousse – 12 mm HC – 2 mm mousse – 12 mm HC
Concept 5	1 mm mousse – 6 mm HC – 1 mm mousse – 19 mm HC
Concept 6	1 mm mousse – 6 mm HC – 2 mm mousse – 18 mm HC

À la suite des simulations des différents concepts et après la comparaison de leurs performances respectives, on choisira le concept le plus efficace au niveau de ses propriétés acoustiques et de sa masse pour le comparer avec des résultats expérimentaux de *liners* à deux degrés de libertés soumis à une excitation de 130dB.

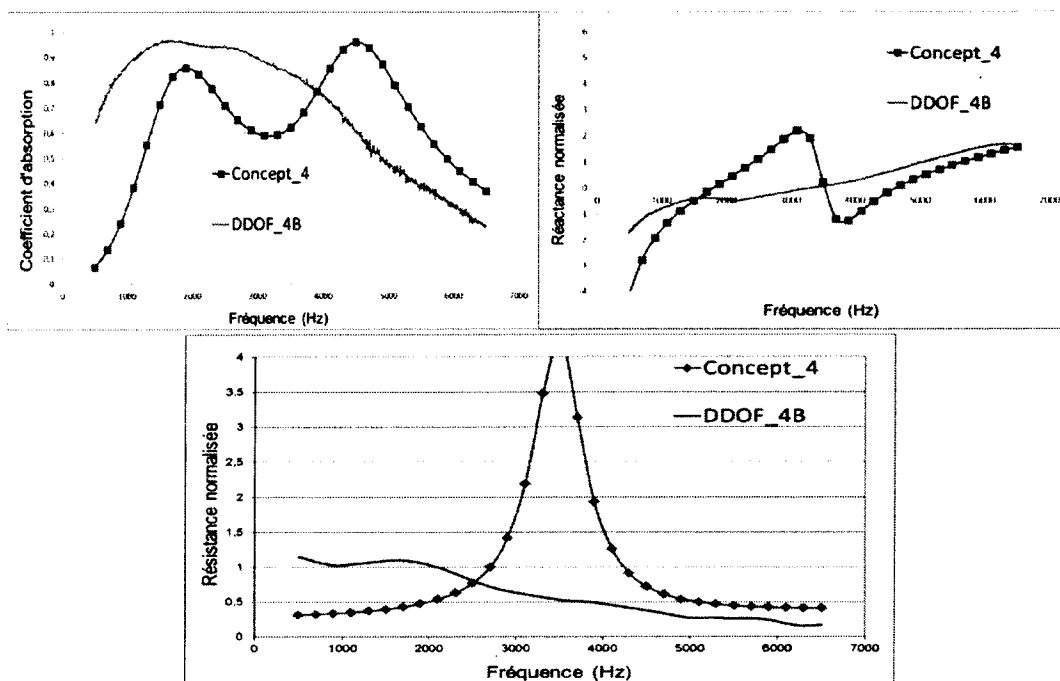


Figure VI-16: Comparaison des performances acoustiques entre le concept 4 et un DDOF conventionnel

A partir des courbes de comparaisons, représentées par la Figure VI.16, on peut diviser la plage fréquentielle en deux parties : dans la première, allant jusqu'à 3500Hz, le *liner* conventionnel est acoustiquement plus performant que le concept 4, et dans la deuxième, qui commence à partir de 3500Hz, notre concept est plus performant. Mais globalement les performances des deux sont assez proches. Au niveau de la masse surfacique, présentée dans le Tableau VI.18, on a le même constat.

Tableau VI.18: Comparaison du poids entre le concept 4 et le DDOF-4B

	<i>DDOF-4B</i>	Concept 4
Masse surfacique (Kg/m ²)	11,266	10,998

Conclusion :

Les mousses, à faibles épaisseurs, fabriquées à partir de poudre d'acier Inoxydable sont assimilables à des plaques perforées en termes de performances acoustiques. Leur procédé de fabrication fait que leur absorption est sélective et non pas large bande. Leur masse surfacique est intéressante par rapport aux plaques perforées.

VII. CONCLUSION

On a mené une étude sur deux différentes mousses: la première est en Nickel et la deuxième est en acier inoxydable, en pensant que leur comportement acoustique est semblable. En réalité ces deux mousses étudiées sont différentes au niveau des performances acoustiques. En effet la mousse de Nickel possède un comportement large bande ce qui n'est pas le cas des mousses d'Inox qui ressemble plus à des plaque perforées avec une absorption sélective. Il s'avère que le procédé de fabrication est la cause principale de cette différence. La mousse d'Inox, contrairement à la mousse de Nickel, présente une hétérogénéité au niveau de la taille et la distribution des pores, en plus du fait que la porosité est en majorité fermée et non pas ouverte comme on s'attendait.

En ce qui concerne les mousses de Nickel, on a tiré profit de leur comportement acoustique linéaire large bande. À partir de nos résultats, on peut dire que ces mousses ont un potentiel important, surtout si on arrive à mieux contrôler leur résistance non pas par l'augmentation de l'épaisseur mais plutôt par la diminution de leur taille de pore. Pour cela un modèle simple a été développé pour prévoir les propriétés macroscopiques à partir du diamètre moyen des pores. Le modèle permet d'un côté de faciliter le travail du fabricant de la mousse vue que celui-ci peut contrôler plus au moins le diamètre des pores, et d'un autre côté on pourra définir la taille de pores optimale requise pour chaque application acoustique.

Les performances acoustiques des concepts dans lesquels la mousse de Nickel est intégrée sont bonnes. Une étude d'optimisation au niveau des dimensions des constituants du concept est nécessaire pour tirer le maximum de profit des capacités de ces mousses de Nickel en tant qu'absorbeur large bande.

Pour les mousses d'Inox, elles ne peuvent pas être utilisées en tant qu'absorbeur large bande. Cependant, ces dernières présentent l'avantage de se comporter comme des plaques perforées et on pourra tirer profit de cette observation. En effet, malgré leur hétérogénéité microscopique, acoustiquement parlant, elles sont homogènes puisque d'un échantillon à un autre, du même grade, elles gardent la même réponse acoustique. En plus, leur fabrication à l'échelle industrielle demande moins de précision comparativement au perçage des trous au niveau des plaques perforées.

À ce stade-ci, si on ne s'intéresse qu'à la performance acoustique des mousses d'Inox, on peut dire que ce matériau possède un potentiel lui permettant de concurrencer les plaques perforées en tant qu'absorbeur sélectif.

Selon des travaux récents, on pourrait obtenir une mousse en acier Inoxydable avec une microstructure semblable à celle des mousses de Nickel en utilisant un liant thermodurcissable à la place du thermoplastique. De cette manière, on aura une mousse en Inox avec une microstructure homogène, une porosité en majorité ouverte et un comportement acoustique large bande. Le procédé de fabrication pourrait donc être amélioré pour avoir une mousse plus homogène et obtenir une microstructure similaire aux mousses de Nickel et chercher ainsi un comportement acoustique large bande.

Au niveau de leur masse surfacique, les mousses de Nickel et d'Inox sont intéressantes comparativement aux plaques perforées, ceci est dû principalement à leur grande porosité. En effet pour un certain volume du matériau en mousse, seulement 7 à 20% est constitué de matière, le reste étant de la porosité ouverte ou fermée.

La grande porosité de ces matériaux est aussi bénéfique au niveau du coût de fabrication, puisque la fabrication des mousses requiert moins de matière première par rapport aux plaques perforées, et de nos jours, le prix des métaux bruts est de plus en plus élevé.

En résumé, notre étude de faisabilité montre que :

- des mousses métalliques se présentent comme une alternative intéressante aux « *liners* » actuels quant à leurs performances acoustiques et poids quand elles sont prises seules ou comme constituant d'un *liner*;
- un contrôle du procédé est possible pour optimiser les propriétés de la mousse;
- selon la configuration, un comportement linéaire peut être obtenu;
- des mousses homogènes avec une taille de pore optimisée peuvent être obtenues.

Perspective :

Lors de notre étude de faisabilité, certain points n'ont pas pu être étudiés. Pour compléter cette étude, les points suivants devront être abordés :

- Le coût de production à grande échelle : en premier lieu, il faudra étudier le coût de fabrication de la mousse à l'échelle industrielle avec toute l'infrastructure et les machines nécessaires pour la mise en forme de la mousse. À la suite, il faudra aussi

trouver une technique pour intégrer ou coller la mousse dans le *liner*, tout en gardant des propriétés mécaniques acceptable pour notre utilisation. Le coût total de la production, de la mise en forme et de la mise en place de la mousse dans un *liner* doit concurrencer le coût de fabrication des *liners* conventionnels.

- selon de la zone chaude ou froide dans laquelle il se placera au niveau du réacteur, le *liner* intégrant la mousse doit avoir une certaine tolérance aux conditions de l'environnement :
 - Haute températures pour le conduit chaud (600 à 650°C);
 - Basse température pour le conduit froid (-50 à 100°C);
 - Pression statique jusqu'à 150 kPa dans les conduits en aval et en légère dépression dans le conduit en amont;
 - Tenue en fatigue acoustique et aux vibrations du moteur;
 - Tenue à la corrosion et à l'abrasion;
 - Durée de vie 65 000 cycles et/ou 100 000 h (court courrier), 30 000 cycles et/ou 200 000 h (long courrier).
- Maintenance : les mousses doivent avoir une bonne tenue aux liquides de nettoyage, hydraulique et carburant, ils doivent avoir la capacité de drainage. En cas de réparation majeure, il faut envisager la possibilité de monter et démonter sans réglage.

Une fois complété, les étapes subséquentes seraient :

- Une étude d'optimisation du procédé de fabrication de la mousse;
- Une étude d'optimisation des dimensions des constituants d'un *liner*;
- La fabrication d'un prototype de *liner* à base de mousse métallique pour pouvoir tester et valider les performances de celui-ci;
- Une étude approfondie sur le coût de fabrication d'un tel *liner*.

Références

J.F. Allard, (1993), "Propagation of Sound in Porous Media", London and New York, Elsevier Applied Science, Chapter 10.

J.F. Allard, N. Atalla, (2009), "Propagation of sound in porous media. Modeling sound absorbing materials", UK, 2nd Ed, Wiley Chichester, 351p

Y. Atalla, R. Panneton, (2005), "Inverse Acoustical Characterization Of Open Cell Porous Media Using Impedance Tube Measurements", Canadian Acoustics, 33(1), 11-24.

P. Asholt, (1999), "Metal Foams and Porous Metal Structures", Bremen, Germany: MIT-Verlag, ed. J. Banhart, MF Ashby, and NA Fleck, 133p.

N. Atalla, F.Sgard, (2007), "Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models", J.sound Vib. 303(1-2), 195-208p

J. Banhart, (2001), "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams", Progress in Materials Science .46(6), 559–632p.

F. Baumgärtner, I. Duarte and J. Banhart, (2000), "Industrialization of powder compact foaming process, Adv. Eng. Mater, 168p.

G. W. Bielak, A. S. Hersh, J. W. Premo, (1999), "Advanced turbofan duct liner concepts", 9th AIAA/ CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit, NASA CR-1999- 209002.

M. Biot, (1956), "The theory of propagation waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range. Higher frequency range ", J. Acoust. Soc.Am. 28, 168-191p

Y. Champoux, J. F. Allard, (1991), "Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media"J. App. Phys. 70(4), 1975-1979p.

F. Chevillotte, C. Perrot, R. Panneton, (2010), "Microstructure based model for sound absorption predictions of perforated closed-cell metallic foams", J. Acoust. Soc. Am, 128 (4), 11p

I.B. Crandall, (1926), "Theory of Vibrating Systems and Sound", New York, D.Van Nostrand Co, 272p

A. Cunningham, N. C. Hilyard, (1994), "low density cellular plastics: Physical Basis of Behaviour", London, Chapman and Hall, 369p.

M. Delany, E. Bazley, (1970), "Acoustical properties of fibrous materials", Appl. Acoust, 3, 105-106.p

R. Dwivedi, J. Fauerbach, (2001), "A new method for production of micro-porous metals", P/M Sci. and Tech. Briefs, 3 (2), 22–25.p

M. Gauthier, L. F. Lefebvre, Y. Thomas, M. Bureau, (2004), "Production of metallic Foams Having Open Porosity Using a Powder Metallurgy Approach", Materials and manufacturing processes, 19(5), 793–811p.

S. Gasser, Y. Brechet, F. Paun, (2004), "Materials Design for Acoustic Liners: an exemple of tailored Multifunctional Material", Advanced engineering materials, 6(1-2)

S. Gasser, (2003), " Étude des propriétés acoustiques et mécaniques d'un matériau métallique poreux modèle à base de sphères creuses de Nickel", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, [en ligne] : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00004438>.

E. Gros (2006), "Caractérisation thermique des mousses métalliques," Mémoire de maîtrise, Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke.

F. Han, G. Seiffert, Y. Zhao, B. Gibbs, (2003) ,"Acoustic absorption behaviour of an open-celled aluminium foam", J. Phys. D: Appl. Phys, **36**, 294-302p.

F. Han, Z. Zhu, C. Liu, (1997), "Nonlinear Internal Friction Character of Foamed Aluminum“, Royaume-Uni, Elsevier, 37(9), 1447p.

U. Ingard, (1994), "Notes on sound absorption technologies", New York, Noise Control Fundation, 94(02).

J. Julliard, (2003), "Problématique des matériaux absorbants sonores pour applications sur turboréacteur", Rapport technique, Snecma Moteurs.

J. Julliard, (2006), "Problématique des matériaux absorbants sonores pour applications sur turboréacteur", Snecma Moteurs, Journée Scientifique de l'ONERA

D. L. Johnson, J. Koplik, R. Dashen, (1987), "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media" J. Fluid. Mech, 176, 379-401p

D. Lafarge, (1993), "Propagation du son dans les matériaux poreux a structure rigide saturés par un fluide visco-thermique", France, Thèse de doctorat de l'université du Maine, 1-296p.

L. P. Lefebvre, Y. Thomas, (2003), "Method of making open cell material", US Patent, No. 6660224

T. J. Lu, F. Chen, D. He, (2000), "Sound absorption of cellular metals with semi open cells", J. Acoustic. Soc. Am, 108, 1697p

D.Y. Maa, (1975), "Theory and design of micro perforated-panel sound-absorbing construction", Scientia. Sinica, 17, 55-71p

D. Y. Maa, (1987), "Micro perforated panel wide-band absorber", Noise control Eng, 29, 77-84p.

D.Y. Maa, (1988), "design of microperforated panel construction", Acta-Acust, 13(3), 174-180p

T. H. Melling, (1973), "The acoustic impedance of perforates at medium and high sound pressure levels", J. Sound and Vibration, 29(1), 1-65p.

Y. Miki, (1990), "Acoustical properties of porous materials – Generalizations of empirical models," J. Acoust. Soc. Jpn, 11(1), 19-24p

R. E. Mottsinger, R. E. Kraft, (1991), "Design and Performance of Duct Acoustic Treatment", Chapter 14, Volume 2, Aeroacoustics of flight Vehicles: Theory and Practice, NASA RP-1258.

R. E. Motesinger, R. E. Kraft, (1991), "Design and Performance of Duct Acoustic treatment", Aeroacoustics of flight Vehicules: Theory and practice, NASA, 2(14).

P. Navi, G. Tornare, (2006), "Propriétés acoustique des matériaux", Suisse, PPUR, 154p

X. Olny, C. Boutin, (2003), "Acoustic Wave Propagation In Double Porosity Media" J. Acoust. Soc.Am. 114(1).

Norme OACI: Les 13 chapitres de l'annexe 16, VOL.1, Bruit Des Aéronefs, http://www.aviation-civile.gouv.fr/html/actu_gd/pdf/B1_normes_OACI.pdf.

R. Panneton, (2007), "Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media", J.Acoust. Soc. Am, 122, 6p

R. Panneton (2001), "Analyse acoustique de mousses métalliques," Rapport interne, Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), génie mécanique, Université de Sherbrooke

D. Pilon, R. Panneton, F. Sgard, L.-P. Lefebvre, X. Olny, and R. Reyes (2004), "Linking the micro-structural properties of nevel sound absorbing metallic foams to their macroscopic acoustic parameters," Résumé de conference, Inter-noise 2004 (Prague, Czech Republic, 22-25 août)

T. L. Parrott, M. G. Jones, (2006), "Cascaded perforates as one-dimensional, Bulk absorbers", American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2402

R. Pride, F. D. Morgan, A. F. Gangi, (1992), "Drag forces of porous-medium acoustics," Physical review 47(9), 4964-4978p.

L. Rayleigh, (1967), "Theory of Sound", 94(02)

D. L. Sutliff, M. G. Jones, (2008), "Foam-Metal Liner Attenuation of Low-Speed fan noise", NASA/Tm, 215227, AIAA-2897, 26p.

J. L. Wojtowicki, R. Panneton, (2005), "Improving the efficiency of sealing parts for hollow body network", SAE Tech. Paper, 01-2279.

J. Wood, (1997), "Metal Foams", Bremen, Germany, Ed. J. Banhart and H. Eifert, 31p

T. H. Wubben, S. Odenbach, (2005), "Stabilisation of liquid metallic foams by solid particles", Colloids and Surfaces, Physicochemical and Engineering, 266, 207-213p

Y. Salissou, R. Panneton, (2006), "COMPARISON OF METHODS FOR CHARACTERIZING SOUND ABSORBING MATERIALS", Physics, 61 1259(2)

J. Yu, R. E. Kraft, H. W. Kwan, (1996), "Acoustic treatment design scaling methods", Advanced treatment impedance Models for high frequency ranges, NASA-26617(2).

C. Zwikker, C. W. Kosten, (1949), "Sound absorbing materials," Elsevier, New York, 174p.